



TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

TUM School of Engineering and Design

**Architektur für ein unternehmensübergreifendes
Service-System mit intelligenten, modularen
Sonderladungsträgern**

Johannes Robert Zeiler

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering and Design
der Technischen Universität München
zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Manfred Hajek

Prüfer der Dissertation: 1. Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner

2. Ass.-Prof. Dr.-Ing. Christian Landschützer

Die Dissertation wurde am 27.12.2021 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die TUM School of Engineering and Design am 25.05.2022 angenommen.

Herausgegeben von:

Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner

fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Technische Universität München

Zugleich: Dissertation, München, Technische Universität München, 2022

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – dem Autor vorbehalten.

Layout und Satz: Johannes Robert Zeiler

Copyright © Johannes Robert Zeiler, 2022

Vorwort

Die vorliegende Doktorarbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml) der Technischen Universität München. Eine wichtige Grundlage für die präsentierten Forschungsergebnisse bildete dabei das von mir bearbeitete Forschungsprojekt iSLT.NET (Netzwerk für intelligente, modulare Sonderladungsträger), welches durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert wurde. Ich möchte mich an dieser Stelle bei allen am Projekt beteiligten Forschungspartnern und den jeweils involvierten Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern für diese interessante und lehrreiche Zeit bedanken.

Ein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Professor Johannes Fottner für die immerwährende Unterstützung, die kritische Auseinandersetzung mit meinem Forschungsthema und die bereichernden Denkanstöße. Zudem bedanke ich mich bei Herrn Professor Christian Landschützer für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Koreferats sowie bei Herrn Professor Manfred Hajek für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Auch möchte ich an dieser Stelle Herrn Professor Willibald A. Günthner danken, der mich, trotz der bereits eingeleiteten Lehrstuhlübergabe an seinen Nachfolger, noch in das Lehrstuhlteam aufnahm.

Den Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl bin ich sehr dankbar für die große Unterstützung und die lehrreichen Diskussionen. Darüber hinaus möchte ich meinem Mentor Marcus Röschinger danksagen, der mir auch nach seiner Lehrstuhlzeit mit Rat und Tat zur Seite stand. Den von mir betreuten Studentinnen und Studenten danke ich für ihren Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit.

Meiner Familie und besonders meiner Frau danke ich für die unermüdliche Unterstützung und den Rückhalt, ohne den diese Arbeit nicht zustande gekommen wäre.

Kurzzusammenfassung

Das Behältermanagement von Sonderladungsträgern in der Automobilindustrie steht vielzähligen Herausforderungen gegenüber. So führt die steigende Bauteilvielfalt und -komplexität zu einer großen Anzahl von unterschiedlichen Sonderladungsträgertypen, die für den Transport, die Lagerung und die Bereitstellung an der Produktion eingesetzt und entsprechend verwaltet werden müssen. Darüber hinaus kommt es aufgrund der geringen Transparenz innerhalb der Behälterkreisläufe zu Problemen wie etwa Behälterengpässen, Unter-, Überbeständen oder Behälterschwund. Maßnahmen, die diesbezüglich ergriffen werden, um einen Produktionsstopp zu verhindern, reichen von Sondertransporten bis hin zum Einsatz von Einwegverpackungen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die konzipierte Architektur für ein unternehmensübergreifendes Service-System mit intelligenten, modularen Sonderladungsträgern präsentiert, welche darauf abzielt die beschriebenen Problemstellungen innerhalb des Behältermanagements zu lösen und neue Optimierungspotenziale zu identifizieren. Dabei wird die digitale Transformation von Sonderladungsträgern zu cyber-physischen Systemen mit der Modularität des physischen Ladungsträgers verbunden, um datenbasierte und datenunterstützte physische Services anbieten zu können. Die konzipierte Fünf-Schichten-IoT-Architektur ermöglicht es prozessrelevante Daten unternehmensübergreifend zu sammeln und diese gebündelt über eine Cloud-Plattform dem Anwender bereitzustellen. Dabei unterstützt sie das Behältermanagement von der Behälterentwicklung über den Einsatz bis zum Ende des Lebenszyklus der einzelnen Module des Ladungsträgers.

Die innerhalb dieser Arbeit durchgeführte Evaluation der Fünf-Schichten-IoT-Architektur zeigt die erzielbaren Mehrwerte und die technologiebedingten Grenzen auf. So kann durch den Einsatz der Architektur eine Verbesserung der Behältermanagementprozesse (Digitalisierung und Automatisierung), der Kundenzufriedenheit und der ökologischen Nachhaltigkeit erzielt werden. Die Steigerung der Transparenz in Bezug auf den Behälterkreislauf führt zu einer Verbesserung der Prozessqualität bei allen Teilnehmern der Lieferkette.

Schlüsselwörter: intelligenter modularer Sonderladungsträger, unternehmensübergreifendes Service-System, IoT-Architektur, Behältermanagement

Abstract

The container management of special load carriers in the automotive industry faces numerous challenges. For instance, the increasing variety and complexity of components lead to a large number of different types of special load carriers, which have to be administrated by the container management accordingly. In addition, the lack of transparency within the container cycle leads to problems such as bottlenecks, understocking, overstocking or even container loss. Measures that are taken to prevent a production stop range from special transports to the use of disposable packaging.

This thesis presents the designed architecture for a cross-company service system with smart and modular special load carriers, which aims to solve the described problems within the container management and to identify new optimization potentials. Therefore, the digital transformation of special load carriers into cyber-physical systems is combined with the modularity of the physical load carrier in order to offer data-based and data-supported physical services. The designed Five-Layer-IoT-Architecture collects process-relevant data across companies and offers the user the processed data via a cloud platform. Thereby, the architecture supports the container management from the development through the usage to the end of the life cycle of the load carrier's individual modules.

The evaluation of the Five-Layer-IoT-Architecture carried out within this thesis shows the achievable added value and technology-related limitations. Thus, by using the architecture, improvements within the container management processes (digitization and automation), in customer satisfaction and in environmental sustainability can be achieved. The increasing transparency regarding the container cycle leads to an improvement in process quality among all supply chain participants.

Keywords: smart and modular special load carrier, cross-company service system, IoT architecture, container management

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Kurzzusammenfassung	III
Abstract	V
Inhaltsverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	XI
Formelzeichenverzeichnis	XV
1 Einleitung	1
1.1 Herausforderungen im Behältermanagement innerhalb der Automobilindustrie	3
1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	8
2 Grundlagen und Begrifflichkeiten	11
2.1 Behälter in der Logistik	11
2.1.1 Arten von Ladungsträgern	11
2.1.2 Grundlagen zu Behälterkreisläufen	13
2.1.3 Aufgaben des Behältermanagements	15
2.2 Industrie 4.0, IoT und Informationssysteme	17
2.2.1 Definition wichtiger Begrifflichkeiten in Bezug auf das IoT	17
2.2.2 Informationssysteme und Architekturen	18
2.3 Grundlagen zum Einsatz cloudbasierter Service-Systeme	21
2.3.1 Service-Systeme und serviceorientierte Architekturen	21
2.3.2 Cloud-Computing	23
2.3.3 Berechtigungskonzepte für cloudbasierte Service-Systeme	27
2.4 LPWAN als Informations- und Kommunikationstechnologie	31
2.4.1 Grundlagen von LPWAN	31
2.4.2 LoRaWAN als Vertreter von LPWAN-Technologien	33

3	Stand der Wissenschaft und Technik	41
3.1	Themenbereiche und Bewertungskriterien der Literaturrecherche	41
3.2	Ansätze für modulare Sonderladungsträger	42
3.3	Referenzarchitekturen für das IoT	45
3.4	Intelligente Behälter in der Logistik	52
4	Forschungsbedarf und methodische Vorgehensweise	61
4.1	Konkretisierung der Forschungslücke und Ableitung der Forschungsfragen	61
4.2	Beschreibung des übergeordneten wissenschaftlichen Vorgehens	64
5	Analyse der Ist-Situation und Anforderungsdefinition	69
5.1	Vorgehen zur Anforderungsidentifikation	69
5.2	Analyse der Ist-Prozesse im Behältermanagement	70
5.3	Identifizierte Anforderungen an die Architektur des Service-Systems	78
6	Architektur für ein Service-System mit intelligenten, modularen Sonderladungsträgern	83
6.1	Vorgehensweise zur Erstellung des Architekturkonzepts	83
6.2	Konzipierte Services und Zuordnung zu Nutzenkategorien	85
6.2.1	Serviceumfänge und Funktionsmodelle	86
6.2.2	Zuordnung der Services zu Nutzenkategorien	105
6.3	Konzeptionelles Datenmodell	109
6.4	Aufbau der Fünf-Schichten-IoT-Architektur	119
6.4.1	Schicht 1 – Intelligente Objekte	120
6.4.2	Schicht 2 – Kommunikation	123
6.4.3	Schicht 3 – Cloud & Applikation	125
6.4.4	Schicht 4 – Client	129
6.4.5	Schicht 5 – Anwender	131
6.5	Berechtigungskonzept für die Nutzung des Service-Systems	133
6.6	Zusammenfassung und beispielhafter Ablauf eines Service	138
7	Evaluierung der konzipierten Architektur	143
7.1	Beschreibung des Evaluationsvorgehens	143
7.2	Evaluierung der Umsetzbarkeit	145
7.2.1	Prototypische Implementierung der Fünf-Schichten-IoT-Architektur	145
7.2.2	Umsetzung und Überprüfung der konzipierten Services	151
7.2.3	Zusammenfassung der Evaluationsergebnisse	166

7.3 Überprüfung der Anforderungserfüllung	167
7.4 Nutzenbewertung	175
7.4.1 Design und Aufbau der Umfrage	176
7.4.2 Auswertung der Umfrageergebnisse	177
7.5 Abschließendes Fazit und Beantwortung der Forschungsfragen	185
8 Zusammenfassung und weiterer Forschungsbedarf	189
Literaturverzeichnis	193
Abbildungsverzeichnis	213
Tabellenverzeichnis	217
Anhang A Zusatzinformationen zur Evaluierung	A-1
A.1 Vergleich von Funktechnologien für den prototypischen Einsatz	A-1
A.2 Fragestellungen und Antwortmöglichkeiten der durchgeführten Umfrage	A-3

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
3GPP	3rd Generation Partnership Project
ABAC	Attribute Based Access Control
AES	Advanced Encryption Standard
AutoID	Automatische Identifikation
BLE	Bluetooth Low Energy
CAD	Computer-Aided Design
CPPS	Cyber-physische Produktionssysteme
CPS	Cyber-physische Systeme
DAC	Discretionary Access Control
EC-GSM	Extended Coverage Global System for Mobile Communications
eMTC	Enhanced Machine Type Communication
EPCIS	Electronic Product Code Information Services
ERM	Entity-Relationship-Modellierung
ERP	Enterprise-Resource-Planning
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
HTTPS	Hypertext Transfer Protocol Secure
IaaS	Infrastructure as a Service
ID	Identifikationsnummer
IDS	Industrial Data Space
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers

Abkürzung	Bedeutung
IETF	Internet Engineering Task Force
IIoT	Industrial Internet of Things
IIRA	Industrial Internet of things Reference Architecture
IMSA	Intelligent Manufacturing System Architecture
imSLT	Intelligenter, modularer Sonderladungsträger
imSLTs	Intelligente, modulare Sonderladungsträger (Plural)
IoT	Internet of Things
IoT-A	Internet of Things Architecture
iSLT.NET	Netzwerk für intelligente, modulare Sonderladungsträger (Projektbezeichnung)
ISM	Industrial Scientific and Medical
IT	Information Technology
ITU-T	International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sectors
IuK-Technologie	Informations- und Kommunikationstechnologie
IVRA	Industrial Value Chain Reference Architecture
JSON	JavaScript Object Notation
LoRa	Long Range
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
LPWAN	Low Power Wide Area Network
LTN	Low Throughput Networks
MAC	Mandatory Access Control
MQTT	Message Queue Telemetry Transport
NIST	National Institute of Standards and Technology
OEM	Original Equipment Manufacturer
OSI	Open Systems Interconnection

Abkürzung	Bedeutung
PaaS	Platform as a Service
POI	Point of Interest
QoS	Quality of Service
QR-Code	Quick Response-Code
QS-Prüfung	Qualitätssicherungsprüfung
RAMI40	Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0
RBAC	Role-based Access Control
RFID	Radio Frequency Identification
SaaS	Software as a Service
SF	Spreading Factor
SLT	Sonderladungsträger
SNR	Signal-to-Noise-Ratio
SOA	Serviceorientierte Architektur
SOBS	Service-orientiertes Logistikkonzept für ein multifunktionales Behältersystem
SSLEA	Situation-aware Smart Logistics Enterprise Architecture
SUS	System Usability Scale
TLS	Transport Layer Security
TUM	Technische Universität München
ULD	Unit Load Device
UML	Unified Modeling Language
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WLAN	Wireless Local Area Network

Formelzeichenverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
ΔT	$^{\circ}C$	Temperaturänderung
$Attr$	–	Attribut
BW	Hz	Bandbreite
GL	dB_i/dB	Leistungsgewinn/-verlust
L_{pl}	dB	Pfadverlust
n	–	Gesamtanzahl der eingegangenen Antworten
NF	dB	Raschzahl des Empfängers
P	–	Permission
$P_{Rauschen}$	dBm	Rauschleistung
P_{Signal}	dBm	Signalleistung
P_{rx}	dBm	Leistung des empfangenen Signals (RSS)
P_{tx}	dBm	Sendeleistung
PA	–	Permission assignment
R	–	Role
S	–	Session
S_{rx}	dBm	Empfangssensitivität
SNR	dB	Signal-Rausch-Verhältnis
U	–	User
UA	–	User assignment

1 Einleitung

Kundenbedürfnisse sind vielfältig. Die geforderte Individualität komplexer Endprodukte nimmt rapide zu. So kann ein BMW 1er bereits jetzt vom Kunden in 63.337.281.418.690.600 möglichen Varianten bestellt werden [Bau-2020]. Verbunden mit kürzeren Produktlebenszyklen erfordert die Bewältigung dieser Variantenvielfalt anspruchsvolle Produktionsumgebungen und flexible Lieferketten, die sich schnell und dynamisch an Neuerungen anpassen können. In vielen Fällen steigt die benötigte Anzahl der Firmen für die Produktherstellung, um bei gleichzeitig sinkender Fertigungstiefe den individuellen Kundenwünschen gerecht werden zu können. Die gegenseitigen Abhängigkeiten von global verteilten Unternehmen einer Supply Chain intensivieren sich [Han-2013, S. 8ff.; Geh-2007, S. 13]. Vor allem die immer komplexer werdende Koordination der Lieferkette stellt eine große Herausforderung für produzierende Betriebe dar. Im Jahr 2019 waren, laut der Zeitschrift *Automobilproduktion*, die drei größten Treiber dieser Komplexität innerhalb der Automobilbranche die Produkt- und Variantenvielfalt, die Nachfrageschwankungen und die global verteilten Produktionsstandorte. Dabei wurden die Top drei Risiken für die Lieferkette identifiziert: Handelsstreitigkeiten mit den daraus resultierenden Unsicherheiten bei den Warenströmen, Rückrufaktionen und Sicherheitsrisiken ausgelöst durch das gesteigerte Qualitätsbewusstsein und durch staatliche Regulierungen sowie Marktschwankungen bedingt durch strukturelle Veränderungen in der Automobilbranche (z. B. Elektromobilität) [Aut-2019, S. 46f.].

Ein unerwartetes Risiko für die Supply Chain trat mit dem weltweiten Ausbruch von COVID-19 vor allem im Jahr 2020 auf. Aufgrund des in vielen Ländern verhängten Lockdowns wurden die meisten nicht wesentlichen Industrieaktivitäten eingestellt und infolgedessen Lieferketten teilweise unterbrochen. So wurde die Belastbarkeit der Lieferkette auf unerwartete Weise getestet und die Notwendigkeit einer widerstandsfähigen und flexiblen Supply Chain offengelegt [Wil-2020, S. 5ff.]. Vor allem eine hohe Transparenz innerhalb der globalen Lieferkette hätte es ermöglicht schneller auf diese unerwarteten Störungen der Supply Chain reagieren zu können [Cho-2020]. In diesem Zusammenhang sind das Verständnis der globalen Materialflüsse und die Transparenz über Lagerorte und -bestände wichtige Faktoren. Sind diese Voraussetzungen gegeben, können u. a. das Risiko für einen Produktionsabbruch minimiert und proaktiv Entscheidungen getroffen werden. Außerdem liegt in der Automatisierung und Digitalisierung die Chance den Auswirkungen globaler Pandemien auf die Lieferkette besser begegnen zu können. Laut dem DHL Report *Post-Coronavirus Supply Chain Recovery*

werden Innovationen und die Skalierung neuer Technologien in der Robotik, Automatisierung, Datenanalyse und im Internet der Dinge (engl. Internet of Things¹, abgekürzt IoT) für den zukünftigen Erfolg entscheidend sein [Wil-2020].

Bereits vor COVID-19 sind im Bereich der Logistik das Internet der Dinge und die Digitalisierung unter dem Schlagwort Industrie 4.0 ein fester Bestandteil geworden.

„Der Begriff „Industrie 4.0“ stand ursprünglich für die Autonomisierung der Logistik im Sinne eines „Internets der Dinge“. Inzwischen ist die vierte industrielle Revolution zum Synonym für die allgemeine Digitalisierung geworden. [...] Wer heute nicht über die Digitalisierung seiner Supply Chain nachdenkt, riskiert seine Existenz. Es werden diejenigen gewinnen, die Apps und neue Geschäftsmodelle entwickeln, deren Kundennutzen sich intuitiv erschließt“ [Hom-2015].

So werden durch die Integration innovativer Technologien in bestehende Logistiksysteme neue Ansätze entwickelt, um flexiblere und anpassungsfähigere Systeme zu ermöglichen [Fot-2021]. Fortschritte in der Kommunikations- und Computertechnologie und die dadurch deutlich verbesserte Konnektivität und Rechenleistung bei reduzierter Hardwaregröße ermöglichen eine vereinfachte Integration eingebetteter Systeme in produktionstechnische und logistische Objekte. Diese intelligenten und vernetzten Objekte tragen in Kombination mit software- oder webbasierten Diensten zur Erhöhung der Transparenz, Effizienz und Flexibilität in Fertigungs- und Logistikprozessen bei. Dies hat zur Folge, dass immer mehr intelligente Objekte und cyber-physische Systeme (CPS) Anwendung in Logistiksystemen finden [Kag-2013, S. 17ff.; Por-2014].

CPS sind Systeme, die ihre Umwelt mit Sensoren erfassen, verfügbare Daten auswerten und mithilfe von Aktoren auf die physikalische Welt einwirken² [Bau-2014, S. 15f.]. Laut der Recherche von *Automobilproduktion* setzen auch Logistikentscheider vermehrt auf CPS, um die Zusammenarbeit innerhalb der Supply Chain zu stärken. Dabei wird die zukünftige Bedeutung von CPS für die Supply Chain größer eingeschätzt als die von Enterprise-Resource-Planning-Systemen (ERP-Systemen) [Aut-2019, S. 46f.]. Vor allem nach den Verwerfungen durch COVID-19 bieten CPS die Möglichkeit die Zusammenarbeit und Transparenz innerhalb der Supply Chain zu verbessern. So können bspw. durch ein IoT-getriebenes Bestandsmanagement, in dem Sensoren Behälterfüllstände kontrollieren und einzelne Behälter lokalisiert werden können, die Transparenz der Lagerbestände und Warenströme erhöht werden. Dies ermöglicht Unter-

¹ Der Begriff „Internet of Things“ wird in Unterabschnitt 2.2.1 genauer erläutert.

² Eine ausführlichere Definition von CPS findet sich in Unterabschnitt 2.2.1.

nehmen aktuelle Lagerbestände abzurufen, diese bei Bedarf zu erhöhen oder zu reduzieren und den Materialfluss anhand einer soliden Datenbasis präziser zu steuern. So können Bestände verringert und dadurch Liquidität freigesetzt werden [Fah-2020].

Die Motivation für diese Forschungsarbeit resultiert aus den vielseitigen Möglichkeiten, die der Einsatz von CPS in der Supply Chain genauer genommen im Behältermanagement³ (z. B. das beschriebene IoT-getriebene Bestandsmanagement) bietet. Hierfür werden im nächsten Abschnitt die zentralen Herausforderungen des Behältermanagements in der Automobilindustrie genauer beleuchtet und daraus die Zielsetzung dieser Arbeit abgeleitet.

1.1 Herausforderungen im Behältermanagement innerhalb der Automobilindustrie

Seit mehreren Jahrzehnten lässt sich neben den eingangs beschriebenen Herausforderungen eine sinkende Fertigungstiefe beim Original Equipment Manufacturer (OEM) in der Automobilindustrie mit momentan ca. 25 % der Wertschöpfung eines Fahrzeugs feststellen [Klu-2018, S. 48]. Durch diese Auslagerung der Wertschöpfung auf spezialisierte Zulieferer erhöhen sich der Aufwand der Koordination und die Anforderungen an den Materialfluss zwischen den internen und externen Wertschöpfungspartnern, wodurch sich komplexe Zuliefer- und Distributionsnetzwerke entwickelt haben. Um innerhalb dieser Netzwerke die hohen Transportanforderungen zu gewährleisten, werden neben Standardladungsträgern (z. B. Europoolpalette nach DIN EN 13698) auch eine Vielzahl von Sonderladungsträgern eingesetzt [Sch-2011]. Sonderladungsträger (siehe Abbildung 1-1) sind Ladungsträger, die für ein bestimmtes Teil oder eine Teilegruppe speziell entwickelt, konstruiert und gefertigt werden [Klu-2018, S. 169].



Abbildung 1-1: Sonderladungsträger für Beifahrerairbags [Zei-2020c, S. 2]

³ Eine Aufgabenbeschreibung des Behältermanagements befindet sich in Unterabschnitt 2.1.3.

Die Gesamtanzahl der Ladungsträger und Behältertypen wächst u. a. aufgrund der Variantenvielfalt der Endprodukte stetig, wodurch auch die Steuerung des Behälterkreislaufs eine wichtige und komplexe logistische Aufgabe geworden ist [Sch-2011]. Ein Behälterkreislauf⁴ in der Automobilindustrie beinhaltet im einfachsten Fall die Leergut-Lieferkette vom OEM zum Lieferanten und umgekehrt die Vollgut-Versorgung, je nach Belieferungsprozess über mehrere Zwischenstufen, bis hin an die Produktionslinie [VDA-5007, S. 21ff.]. Die Steuerung der damit direkt und indirekt verbundenen Behälterprozesse ist eine der Aufgaben des Behältermanagements. Das Behältermanagement stellt die Versorgung der Lieferkette mit Ladungsträgern sicher. Dabei müssen der einwandfreie Zustand und die Verfügbarkeit der Behälter bei möglichst geringen Beständen gewährleistet sein [Str-2005, S. 84]. Bei der Erfüllung dieser Aufgaben sieht sich das Behältermanagement einer Vielzahl von Herausforderungen gegenüber. Eine dieser Herausforderungen ist die geringe Transparenz im Material- und Informationsfluss, welche zu Behälterengpässen führen kann. Eine mögliche Ursache dieser Intransparenz ist die fehlende zeitnahe oder unvollständige Buchung von Behälterbewegungen [Klu-2018, S. 393ff.].

Ladungsträger sind zur Identifikation üblicherweise mit einem Begleitschein (inkl. Barcode) in Papierform ausgestattet. Diese werden allerdings im Behälterkreislauf selten systemseitig registriert. Buchungen von Behälterbewegungen werden meist über einen längeren Zeitraum gesammelt und erst im Nachgang in das System eingetragen. Auch eine lückenlose Ladungsträgerverfolgbarkeit entlang der Prozesskette ist in der Regel nicht realisiert, da die durchgehende Erfassung der Behälter eine große Anzahl von manuellen Scanprozessen und Eingaben benötigen würde. Diese werden aufgrund der dadurch entstehenden Kosten nicht durchgeführt. Zusätzlich kann die Intransparenz im Materialfluss aufgrund von systemseitig nicht verbuchten Behälterausschleusungen, -sperrungen (u. a. bei einer Verschmutzung oder Beschädigung des Ladungsträgers) oder ungemeldeter Zweckentfremdung von Ladungsträgern verstärkt werden [Geh-2007, S. 81f.; Klu-2018, S. 393ff.]. So verschwinden bspw. jährlich durchschnittlich 5 % der Sonderladungsträger ungemeldet aus dem Behälterkreislauf zwischen dem Presswerk und der Montagelinie [Klu-2018, S. 399].

Innerhalb des Informationsflusses werden Daten, die bzgl. des Behälterkreislaufs erfasst werden (z. B. Buchungen von Behälterbewegungen), überwiegend in isolierten Systemen bei den jeweiligen Partnern und Abteilungen gespeichert. So stehen die Daten nicht für die anderen Unternehmen des Behälterkreislaufs zur Verfügung. Häufig tritt das Problem auf, dass Datensätze redundant oder inkonsistent vorliegen, sowohl in unterschiedlichen Systemen im selben Unternehmen als auch in den Systemen

⁴ Die Grundlagen zu Behälterkreisläufen werden in Unterabschnitt 2.1.2 genauer beschrieben.

der anderen Partner des Behälterkreislaufs. Dies hat zur Folge, dass u. a. die durchgeführten Behälterbuchungen zwischen den Unternehmen manuell abgeglichen werden müssen (z. B. via E-Mail oder Telefon) [Wit-2018; Syd-2017, S. 5ff.; Klu-2018, S. 393ff.]. Darüber hinaus werden Beschädigungen und Reparaturen von Ladungsträgern nur bedingt dokumentiert. Dies liegt u. a. daran, dass in der Regel Rahmenverträge mit festen Kostensätzen für Reparaturen abgeschlossen werden und die Dokumentation einen Mehraufwand darstellen würde. Demzufolge fehlen sowohl Schadensdokumentationen als auch detaillierte Reparaturberichte, welche die Transparenz innerhalb des Behälterkreislaufs und bzgl. der Qualität der Ladungsträger erhöhen würden [Sch-2017].

Die geschilderten Problemstellungen innerhalb des Behälterkreislaufs können zu unentdeckten Unter-, Überbeständen und Engpässen bei den beteiligten Partnern führen. Insbesondere bei zeitkritischen Just-in-Time- oder Just-in-Sequence-Prozessen kann dies weitreichende Folgen haben und erfordert deshalb Maßnahmen wie kostspielige Sondertransporte und Einwegverpackungen, um eine störungsfreie Produktion zu gewährleisten. Besonders die Einwegverpackungen aus Karton bieten eine geringere Transportsicherheit und verursachen zusätzliche Kosten durch die Anschaffung und Entsorgung der Kartonnagen. Auch kann es zu einem erhöhten Personalaufwand kommen, falls die Bauteile vor dem Einsatz aufgrund von Produktionsbestimmungen wieder umgepackt werden müssen [Geh-2007, S. 81; Sch-2005]. Dies hat zur Folge, dass regelmäßig Behälter mithilfe von aufwendigen Suchaktionen durch Mitarbeiter⁵ aufgespürt werden müssen, um den Einsatz von Einwegverpackungen möglichst zu vermeiden [Klu-2018, S. 399]. Zur besseren Abfederung von Behälterengpässen werden bei der initialen Berechnung der benötigten Ladungsträger für den Behälterkreislauf prozentuale Aufschläge auf die Gesamtanzahl der Behälter berücksichtigt. Der prozentuale Zuschlag beruht dabei auf dem Erfahrungswissen der für das Behältermanagement zuständigen Mitarbeiter [Sch-2017]. Somit werden bei der Beauftragung des Ladungsträgerherstellers mehr Behälter bestellt, als der Behälterkreislauf für die reine Produktionsversorgung benötigt. Dadurch werden große Sicherheitsbestände aufgebaut. Diese haben eine unnötige Flächen- und Kapitalbindung zur Folge und gewährleisten trotzdem häufig nicht die erforderliche Versorgungssicherheit [Hof-2006, S. 18].

Auch im Kontext der Industrie 4.0 existieren neue Herausforderungen, aber auch große Potenziale für das moderne Behältermanagement. Dabei spielen vor allem eine durchgängige Vernetzung der beteiligten Partner im Behälterkreislauf und eine einheitliche Datenbasis eine große Rolle. So können sowohl Behältermanagement- als auch

⁵ Mit „Mitarbeiter“ sind sowohl Frauen als auch Männer gleichermaßen angesprochen. Zugunsten der besseren Lesbarkeit wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit häufig nur die männliche Form verwendet.

Planungsprozesse optimiert werden [Wit-2018; Klu-2018, S. 20]. Da die aktuellen IT-Systeme der an der Wertschöpfung beteiligten Partner meist isolierte Sonderlösungen darstellen, ist eine solche durchgängige Vernetzung der IT-Systemlandschaften nur mit großem Aufwand realisierbar [Sch-2015]. Auch eine echtzeitfähige, automatische Datenerfassung zur Verbesserung der Datenqualität, bspw. bei der Behälterbuchung, wird meist nur in größeren Unternehmen und dort auch nur in begrenzten Bereichen umgesetzt. In kleinen und mittelständischen Unternehmen, bspw. Zulieferer oder Dienstleister für die Automobilindustrie, werden in der Regel Daten bzgl. des Behälterkreislaufs manuell erfasst und weitergegeben [Sch-2015; Str-2005, S. 157f.].

Mit intelligenten Behältern, durch die Daten zu den Behälterbewegungen in Echtzeit erfasst, gespeichert und verarbeitet werden, können manuelle Prozesse, bspw. die Behälterbuchungen, automatisiert und ein papierbelegloser Warenverkehr realisiert werden [Klu-2016]. Auch die kontinuierliche Lokalisierung der Behälter und die Erfassung der Umgebungsparameter (z. B. Stöße und Temperatur) versprechen großes Potenzial, da Suchzeiten verringert werden und eine verursachungsgerechte Zuordnung von Kosten, u. a. im Schadensfall, möglich ist [Klu-2016; Gün-2017, S. 105ff.]. Darüber hinaus würde die unternehmensübergreifende Sammlung dieser prozessrelevanten Daten die Transparenz innerhalb des Behälterkreislaufs erhöhen und Optimierungsmaßnahmen wie die Reduktion der Sicherheitsbestände erlauben. Allerdings bietet sich die Sammlung von Daten bzgl. des Zustands und der aktuellen Position heute insbesondere bei hochpreisigen Behältern an, da sich momentan die zusätzlichen Kosten für die benötigte Technologie je Behälter im mittleren bis oberen zweistelligen Eurobereich befinden [Str-2005, S. 3f.; Deu-2020; Kes-2019, S. 583ff.].

In der Automobilbranche kommen vor allem die eingangs erwähnten Sonderladungsträger für eine Transformation zu intelligenten Behältern in Frage, da diese in der Beschaffung mit einem durchschnittlichen Behälterpreis von 500 € bis 1500 € kostintensiv sind [Str-2005, S. 157; Geh-2007, S. 82]. Dadurch fällt, prozentual gesehen, der Preis für die Integration von eingebetteten Systemen, wie z. B. zur Zustandsüberwachung und Lokalisierung, im Verhältnis zum Behälterpreis nicht so stark ins Gewicht. Eine empirische Studie von *Göpfert et al.* zeigt, dass Sonderladungsträger bei 86 % der befragten Unternehmen in der Automobilindustrie eingesetzt werden und zwar meist in einem unternehmensübergreifenden Behälterkreislauf und zum Transport von individualisierten Bauteilen und Baugruppen [Göp-2017, S. 29]. Zusätzlich werden Sonderladungsträger für den Transport von fragiler und empfindlicher Ware, wie z. B. Batteriezellen für die Elektromobilität, eingesetzt. Bei Batteriezellen können Temperaturschwankungen oder Erschütterungen während des Transports zu nicht sichtbaren Beschädigungen führen. Diese können durch den Verbau im Endprodukt weitreichende Folgen haben, da zwischen Beschädigung und spontaner Entzündung

der Zelle eine größere Zeitspanne liegen kann [Kab-2017, S. 26ff.]. Da geladene Batterien als Gefahrgut eingestuft werden, kosten die zum Transport benötigten Sonderladungsträger aufgrund der erhöhten Anforderungen ca. 2000 € pro Stück [Ihm-2017, S. 444ff.]. Aufgrund der hohen Anschaffungskosten von Sonderladungsträgern wird versucht den Bestand an Leergut möglichst gering zu halten und trotzdem eine hohe Verfügbarkeit zu gewährleisten. Dafür wird eine hohe Transparenz innerhalb des Behälterkreislaufs vorausgesetzt, um den regelmäßigen Austausch des Leerguts über die Unternehmensgrenzen hinweg störungsfrei aufrecht zu erhalten. Ein intransparenter Kreislauf bedeutet somit eine tendenziell höhere Behälteranzahl und damit höhere Kosten [Geh-2007, S. 80ff.].

Die eingangs beschriebene steigende Bauteilvielfalt und -komplexität erhöhen auch die Vielfalt an Sonderladungsträgertypen. Empirische Untersuchungen haben dabei gezeigt, dass in der Regel konstruktive Optimierungspotenziale bei der Entwicklung von Sonderladungsträgern nicht vollständig ausgeschöpft werden und hohe Instandhaltungskosten⁶ anfallen können. Auch bei gleichen Bauteilen, aber unterschiedlichen Baureihen, gibt es bereits erhebliche Unterschiede beim Behälterkonzept, der Ausstattung und der Bauweise. Dadurch erhöht sich zusätzlich die Anzahl der eingesetzten Behältertypen [Klu-2018, S. 183ff.]. Um dieser steigenden Variantenvielfalt bei Sonderladungsträgern entgegenzuwirken, wird eine Modularisierung der Behälter, bspw. als Baukastenprinzip, angestrebt. In der wissenschaftlichen Literatur⁷ werden vor allem daraus resultierende Kosten- bzw. Investitionseinsparungen bei der Entwicklung, beim Transport und bei der Lagerung (verbesserte Kompatibilität der Ladungsträger) sowie bei der Beschaffung (Skaleneffekte bei Ladungsträgern und Komponenten) genannt [Klu-2018, S. 184; Att-2011; Ros-2016; Mei-2015].

Die geschilderten Problemstellungen und Herausforderungen sowohl im klassischen Behältermanagement als auch in Zusammenhang mit der Einführung des Industrie 4.0-Gedankens zeigen die hohe Relevanz und die großen Potenziale, die sich durch die Integration von eingebetteten Systemen in Ladungsträger, besonders im Sonderladungsträgerbereich in der Automobilindustrie, ergeben. Deshalb fokussiert diese Arbeit das Behältermanagement in der Automobilindustrie. Neben den Ladungsträgern wird eine passende Architektur⁸ für das Gesamtsystem benötigt, welche die

⁶ Die Instandhaltung beinhaltet die Inspektion, Wartung und Instandsetzung (auch Reparatur genannt) von Ladungsträgern [Bun-2019].

⁷ Der aktuelle Stand der Wissenschaft und Technik zu modularen Sonderladungsträgern befindet sich in Abschnitt 3.2.

⁸ Die Grundlagen zu Architekturen in Verbindung mit cyber-physischen Systemen werden in Unterabschnitt 2.2.2 genauer beschrieben.

Nutzung dieser Potenziale ermöglicht. Dies ist auch die zentrale Zielstellung der vorliegenden Arbeit: Die Konzeption einer Architektur, welche die Potenziale der digitalen Transformation von Sonderladungsträgern zu cyber-physischen Systemen mit den zusätzlichen Herausforderungen und Möglichkeiten basierend auf der Modularität von Sonderladungsträgern verbindet und dies für Unternehmen nutzbar macht. Die Zielsetzung wird neben dem Aufbau der vorliegenden Arbeit im folgenden Abschnitt weiter konkretisiert.

1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Aufbauend auf den vorgestellten Problemstellungen und Herausforderungen in der Automobilindustrie leitet sich für diese Arbeit folgende übergeordnete Zielsetzung ab:

Konzeption einer Architektur für den unternehmensübergreifenden Behälterkreislauf, die die Potenziale von intelligenten, modularen Sonderladungsträgern⁹ erschließt und diese für Unternehmen nutzbar macht.

Die sich aus modularisierten und zu cyber-physischen Systemen transformierten Sonderladungsträgern ergebenden Möglichkeiten sollen in Form von Services innerhalb eines Service-Systems für das Behältermanagement bereitgestellt werden. Hier sollen sowohl rein datenbasierte als auch durch Daten unterstützte, physische Services (z. B. Reparatur, Rekonfiguration) durch die Architektur verwirklicht werden, um den beschriebenen Herausforderungen zu begegnen. So sollen manuelle Datenerfassungen und Dokumentationen innerhalb des Behälterkreislaufs und während des Lebenszyklus eines intelligenten, modularen Sonderladungsträgers durchgängig digitalisiert werden. Die unternehmensübergreifend erfassten Daten sollen zu jeder Zeit für alle Teilnehmer des Behälterkreislaufs zugänglich und verfügbar sein. Außerdem sollen mediale Brüche vermieden werden und die Zusammenarbeit aller involvierten Unternehmen des Behälterkreislaufs soll verbessert werden. Die durch die Architektur erbrachten datenbasierten und datenunterstützten physischen Services sollen gezielt die Transparenz (Bestände, Beschädigungen, etc.) und die Effizienz (schlanke Prozesse, Vermeidung von Engpässen, etc.) des unternehmensübergreifenden Behälterkreislaufs erhöhen. Dabei soll die einfache Erweiterung des Service-Systems um weitere Services, Unternehmen und Behältertypen berücksichtigt werden.

Zur Erreichung der formulierten Zielsetzung umfasst die vorliegende Arbeit acht aufeinander aufbauende Kapitel (siehe Abbildung 1-2). Im ersten Kapitel wurden bereits die

⁹ Eine genaue Definition des Begriffs „intelligenter, modularer Sonderladungsträger“ findet sich in Kapitel 4.

aktuellen Herausforderungen im Behältermanagement vorgestellt und es wurde daraus die Zielsetzung abgeleitet. Weitere Grundlagen und wichtige Begrifflichkeiten für diese Arbeit finden sich in Kapitel 2 wieder. Darauf aufbauend wird in Kapitel 3 die durchgeführte Recherche des aktuellen Stands von Wissenschaft und Technik zu modularen Sonderladungsträgern, Referenzarchitekturmodellen für das IoT und zu intelligenten Behältern in der Logistik dargelegt. In Kapitel 4 werden, unter Berücksichtigung der identifizierten Forschungslücke, die Forschungsfragen abgeleitet und das wissenschaftliche Vorgehen genauer beschrieben. Der aktuelle Ist-Prozess des Behältermanagements im Automobilbau wird in Kapitel 5 erläutert. Anschließend werden, basierend auf den Schwachstellen des Ist-Prozesses, die identifizierten Anforderungen an die Architektur des unternehmensübergreifenden Service-Systems mit intelligenten, modularen Sonderladungsträgern strukturiert dargestellt. Basierend auf diesen Anforderungen werden in Kapitel 6 die konzipierten Services mit ihren Funktionsumfängen, das konzeptionelle Datenmodell des Service-Systems und die darauf aufbauende Fünf-Schichten-IoT-Architektur mit zugehörigem Berechtigungskonzept vorgestellt. Kapitel 7 widmet sich der Evaluierung der konzipierten Architektur, wobei die Umsetzbarkeit, die Anforderungserfüllung, der erzielte Nutzen und die Beantwortung der Forschungsfragen überprüft werden. Abschließend werden in Kapitel 8 die Inhalte zusammengefasst und möglicher weiterer Forschungsbedarf identifiziert.

Kapitelstruktur	Inhaltlicher Fokus
1. Einleitung	Herausforderungen, Zielsetzung und Grundlagen für das Verständnis der Arbeit
2. Grundlagen und Begrifflichkeiten	
3. Stand der Wissenschaft und Technik	Aktueller Stand der Wissenschaft, identifizierte Forschungslücke, Forschungsfragen und Vorgehensweise
4. Forschungsbedarf und methodische Vorgehensweise	
5. Analyse der Ist-Situation und Anforderungsdefinition	Anforderungsermittlung, Beschreibung der Services und Funktionsmodelle, konzeptionelles Datenmodell, Aufbau der Fünf-Schichten-IoT-Architektur und Berechtigungskonzept
6. Architektur für ein Service-System mit intelligenten, modularen Sonderladungsträgern	
7. Evaluierung der konzipierten Architektur	Evaluation der Architektur (Umsetzbarkeit, Anforderungserfüllung und Nutzen)
8. Zusammenfassung und weiterer Forschungsbedarf	Zusammenfassung der Arbeit und Ableitung des weiteren Forschungsbedarfs

Abbildung 1-2: Struktureller und inhaltlicher Aufbau der Arbeit

2 Grundlagen und Begrifflichkeiten

In den folgenden Abschnitten werden die Begrifflichkeiten und Grundlagen, die für das Verständnis dieser Arbeit relevant sind, definiert und vorgestellt. Dem folgend wird eine kurze Einführung in das Behältermanagement und in die dabei eingesetzten Ladungsträger gegeben. Weiter werden Begrifflichkeiten in Verbindung mit dem IoT definiert und die Grundlagen von Informationssystemen aufgegriffen. Die für diese Arbeit relevanten Elemente cloudbasierter Service-Systeme werden anschließend näher erläutert. Abschließend werden wichtige Grundlagen zu Low Power Wide Area Networks dargestellt.

2.1 Behälter in der Logistik

Laut *DIN 30781-1* ist ein Ladungsträger „ein tragendes Mittel zur Zusammenfassung von Gütern zu einer Ladeinheit“ [DIN-30781-1]. Ladungsträger sind somit Ladehilfsmittel, deren Ziel es ist, durch die Schaffung einer einheitlichen Schnittstelle den Handhabungsaufwand innerhalb des Materialflusses zu verringern [Gud-2005, S. 427ff.]. Ein Behälter, ein weiteres Ladehilfsmittel, übernimmt neben der tragenden auch eine umschließende oder abschließende Funktion, um das Transportgut während des Transports, des Umschlags oder der Lagerung zu schützen. Oft werden Behälter in der Logistik auch einfach nur als Ladungsträger bezeichnet [Klu-2018, S. 165]. Neben der Transport-, Lager- und Schutzfunktion können Behälter eine Identifikations- und Informationsfunktion (z. B. identifizierbar, informativ), eine Verkaufsfunktion (z. B. ökonomisch, werbend) und eine Verwendungsfunktion (z. B. wiederverschließbar, wiederverwendbar) erfüllen [Hom-2018, S. 6ff.]. Dabei wird grundsätzlich zwischen Ein- und Mehrwegbehältern unterschieden. Wird der Behälter für nur einen Transportvorgang verwendet und anschließend entsorgt, spricht man von Einwegbehälter (z. B. Kartonnage). Mehrwegbehälter, auf die der Fokus dieser Arbeit gerichtet ist, werden mindestens zweimal für den Transport verwendet und sind in der Automobilindustrie weit verbreitet [Hof-2006, S. 18ff.; Klu-2018, S. 393].

2.1.1 Arten von Ladungsträgern

Ladungsträger werden hinsichtlich der zu transportierenden Teile sowie bzgl. der Universalität des Einsatzes unterschieden. Sie können in Kleinladungsträger oder Großladungsträger sowie in Standardladungsträger (Universalladungsträger)

oder Sonderladungsträger (auch Spezialladungsträger genannt) aufgeteilt werden [Klu-2018, S. 166]. Im Folgenden werden die einzelnen Ausprägungen für Mehrwegbehälter genauer beschrieben.

Kleinladungsträger (KLT) sind Behälter, die auf dem Flächenmodul 600 mm x 400 mm aufbauen, oben offen, wiederverwendbar, starr und rechteckig sind. Die Maße des KLT müssen dabei Teile oder Vielfache des Flächenmoduls entsprechen. Sie können automatisiert, mechanisch oder manuell gehandhabt werden, sind aber aufgrund ihrer Größe nicht mit einem Flurförderzeug (z. B. Handhubwagen, Gabelstapler) unterfahrbar. KLT werden meist für den Transport und die Aufbewahrung von Kleingütern oder schüttgutfähigen Massengütern (z. B. Schrauben) verwendet (siehe Abbildung 2-1, links) [DIN-13199-1; Klu-2018, S. 165ff.].

Großladungsträger (GLT) dienen als Ladehilfsmittel für Großteile und sind meistens unterfahrbar, da die Behälterhandhabung aufgrund der Abmessungen und des Gewichts in der Regel mit einem Flurförderzeug erfolgen muss. GLT gibt es in verschiedenen Abmessungen und Ausführungen. Ein Beispiel eines standardisierten GLT ist die Euro-Gitterbox (1240 mm x 835 mm x 970 mm), die nach UIC 435-3 genormt ist (siehe Abbildung 2-1, rechts) [Klu-2018, S. 165ff.].



Abbildung 2-1: Standardisierte Ladungsträger, KLT (links) und Euro-Gitterbox (rechts)

Standardladungsträger sind Behälter, die sich an DIN- oder VDA-Normen orientieren und genormte Abmessungen besitzen. Durch das Setzen eines branchenübergreifenden Standards können die Behälter werks- und unternehmensübergreifend eingesetzt werden. Da diese Behälter nicht nur für ein Bauteil bzw. eine Bauteilgruppe entwickelt werden und flexibel einsetzbar sind, werden sie auch Universalladungsträger genannt. Ein weiterer Vorteil von Standardladungsträgern ist die genaue Abstimmung der Abmaße mit weiteren Ladungsträgertypen, wodurch eine formschlüssige Verschachtelung und volumenoptimierte Stapelbarkeit mit integrierter Sicherungs- und Schutzfunktion ermöglicht wird. Diese Vorteile führen zu einer Reduzierung der Transport-, Lager- und Umschlagskosten [Klu-2018, S. 167ff.]. Ein typischer Vertreter der Standardladungsträger ist der auf der DIN 13199 aufbauende, nach VDA 4500 standardisierte

KLT. Dieser wird in der Automobilindustrie überwiegend eingesetzt. Er ist aus farbigem Kunststoff gefertigt, schlag- und stoßfest, stapelbar sowie poolfähig [VDA-4500; DIN-13199-1]. Poolfähig bedeutet, dass aufgrund der Standardisierung des Behälters verschiedene Unternehmen mit Leergut aus einem gemeinsamen Behälter-Pool versorgt werden können [VDA-5007].

Sonderladungsträger sind Ladehilfsmittel, die für ein bestimmtes Bauteil oder eine Bauteilgruppe speziell entwickelt, konstruiert und gefertigt wurden. Gründe, die den Einsatz von Sonderladungsträgern erfordern, sind eine spezifische Geometrie oder Oberflächenbeschaffenheit des Transportguts, automatisierte Bestückung oder Entnahme der Bauteile (und die dadurch geforderte Positionierungsgenauigkeit), hohe Qualitäts- oder Ergonomieansprüche oder spezielle Gewichts-, Volumen- bzw. Funktionsanforderungen des Bauteils [Klu-2018, S. 169]. Dementsprechend werden im Automobilbau meist kundenindividuelle oder empfindliche Bauteile wie Türinnenverkleidungen, Airbags oder Mittelkonsolen mithilfe von Sonderladungsträgern transportiert. Klassischerweise werden Sonderladungsträger parallel zum Produktentwicklungsprozess entwickelt, da sie direkt von der Geometrie des Transportguts abhängig sind. Dabei wird darauf geachtet, dass das Bauteil trotz einer Maximierung der Packdichte optimal geschützt ist. Zusätzlich werden bei der Entwicklung die Art der geplanten Belieferung und Bereitstellung berücksichtigt. Somit verursachen die Entwicklung und Konstruktion dieser Ladehilfsmittel einen hohen personellen und monetären Aufwand. Die geringe benötigte Stückzahl hat zur Folge, dass Sonderladungsträger aus einem einfachen Außenbehälter (meist einfach verschweißte Stahlprofile) und einem komplexen Innenleben zur Aufnahme des Transportguts bestehen [Att-2011, S. 35ff.; Zei-2020c]. Neben Sonderladungsträgern in GLT-Ausführung gibt es auch Spezial-KLTs. Darunter fallen u. a. Behälter mit besonderen Materialeigenschaften oder mit speziell entwickelten integrierten Bauteilaufnahmen [DIN-30820-1].

2.1.2 Grundlagen zu Behälterkreisläufen

Ein Behälterkreislauf beschreibt den Transport befüllter Mehrwegbehälter von einer Quelle zu einer Senke und den darauffolgenden Rücktransport des Leerguts. Dabei kann der (Rück-)Transport über mehrere Zwischenstationen (Knotenpunkte) erfolgen. Innerhalb der Zwischenstationen können die Behälter u. a. (teil-)befüllt, (teil-)entleert oder gelagert werden. Ein wichtiges Kennzeichen des Kreislaufs ist die Richtungsgebundenheit der Behälterbewegung zwischen den einzelnen Knotenpunkten. Alle Transportbeziehungen des Behälterkreislaufs haben eine einheitliche Richtung (gerichtete Kanten), da nur so ein Kreislauf entstehen kann. Dieser kann in der Realität auch die Form eines Vielecks oder einer Schlinge annehmen [Noa-2013, S. 17ff.]. Neben den Voll- und Leerguttransporten sind auch Instandhaltungsmaßnahmen Teil eines Behälterkreislaufs [Hof-2006, S. 19].

Für Mehrwegbehälter werden drei verschiedene Arten von Behälterkreisläufen unterschieden:

- unternehmensinterner, geschlossener Kreislauf,
- unternehmensübergreifender, geschlossener Kreislauf,
- unternehmensübergreifender, offener Kreislauf [Hof-2006, S. 19].

Bei unternehmensinternen, geschlossenen Behälterkreisläufen verbleiben die Ladungsträger innerhalb der Unternehmensgrenzen und werden nur für den internen Transport genutzt. Ein Beispiel hierfür aus der Automobilindustrie ist der interne Behälterfluss von Sonderladungsträgern zwischen Presswerk und Karosseriebau. Der Transport von Türinnenverkleidungen von einem Lieferanten zum OEM hingegen erfolgt in der Regel nach dem Prinzip des unternehmensübergreifenden, geschlossenen Behälterkreislaufts (beispielhaft in Abbildung 2-2 dargestellt). Dabei sind alle Transportbeziehungen zwischen zwei oder mehreren Unternehmen klar definiert und es werden im Idealfall keine Ladungsträger dem Kreislauf entnommen oder hinzugefügt. Beim unternehmensübergreifenden, offenen Kreislauf wird der Behälterfluss nicht auf eine Lieferkette begrenzt, d. h. die Ladungsträger können sich auch darüber hinaus zwischen Unternehmen bewegen. Diese Form des Behälterkreislaufts wird durch standardisierte Ladungsträger, wie die Euro-Gitterbox, ermöglicht, da diese universell einsetzbar sind [DIN-13429; Hof-2006, S. 19].

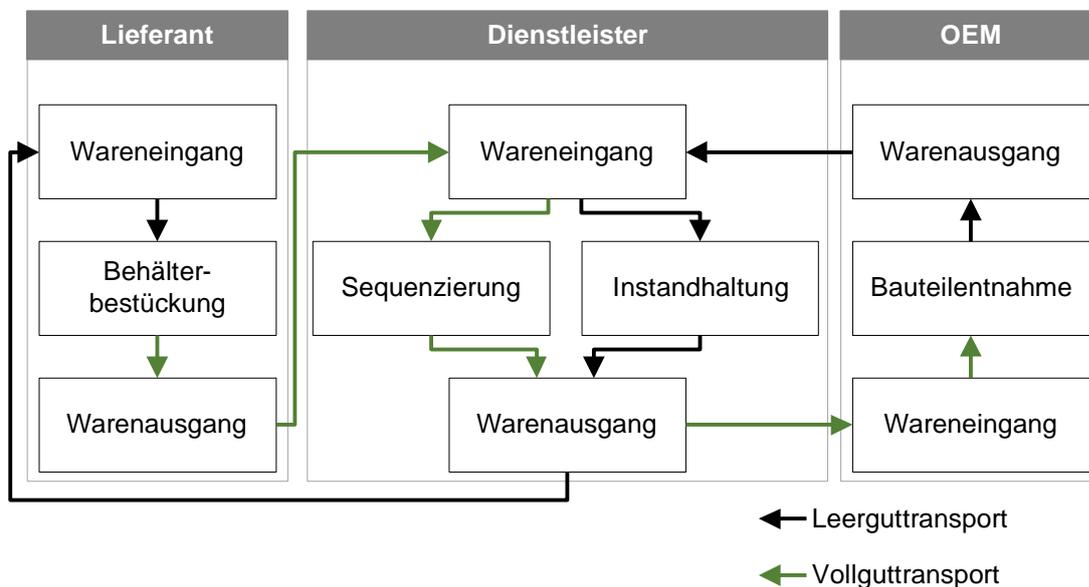


Abbildung 2-2: Beispielhafte Darstellung eines unternehmensübergreifenden, geschlossenen Behälterkreislaufts in der Automobilindustrie

2.1.3 Aufgaben des Behältermanagements

Das Behältermanagement zielt darauf ab, den Behälterkreislauf möglichst effizient zu planen, zu steuern und zu überwachen. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen nach *Hofmann und Bachmann* vier Unterziele verfolgt werden: Senkung der Kosten, Verbesserung der Qualität, Realisierung von Zeitvorteilen und Steigerung der Flexibilität [Hof-2006, S. 19].

Konkret bedeutet dies für das Behältermanagement, die Logistikkosten wie Bestands-, Instandhaltungs- oder Fehlmengenkosten durch geeignete Maßnahmen (u. a. Behälterpooling oder Outsourcing) zu senken. Darüber hinaus soll die Qualität im Behälterkreislauf respektive der Lieferservice erhöht werden [Hof-2006, S. 19f.]. Der Lieferservice (auch Servicegrad genannt) wird durch die vier Kriterien Lieferzeit (Lieferfähigkeit), -zuverlässigkeit (Termintreue), -qualität (Sendungsqualität) und -flexibilität definiert (siehe [Arn-2008, S. 8]). Eine Steigerung des Lieferservice kann durch eine verbesserte Planung und Transparenz im Behälterkreislauf und die dadurch geschaffenen Möglichkeiten frühzeitig und proaktiv Gegensteuerungsmaßnahmen einleiten zu können, erzielt werden. Vor allem die effizienzsteigernde Umgestaltung und die Synchronisation von Prozessen können Materialflüsse beschleunigen und damit die Umlaufgeschwindigkeit erhöhen. So können weitere Zeitvorteile für den Behälterkreislauf realisiert werden. Auch für das Ziel der Flexibilitätssteigerung, der Fähigkeit kurzfristig auf Änderungen in der Behälternachfrage reagieren zu können, spielt die Schaffung von transparenteren Materialflüssen eine entscheidende Rolle. Die häufige Erfassung von Behälterbewegungen und eine weitreichende Integration von IT-Systemen sind dafür Grundbausteine [Hof-2006, S. 19f.].

Das St. Galler Behälter-Management Modell (siehe Abbildung 2-3) gliedert sich neben dem bereits beschriebenen Zielsystem in fünf Aufgabenbereiche für ein erfolgreiches Behältermanagement auf:

- Operative Behälterbewirtschaftung,
- Behältermanagement-Organisation,
- Behälter-(Management)Finanzierung,
- IT-Unterstützung,
- Behälterentwicklung [Hof-2006, S. 22].

Unter die operative Behälterbewirtschaftung fallen die Aufgaben der Bedarfsermittlung, der Bestandsführung, der Flusssteuerung, des Performance Measurements (anhand von Kennzahlen) und der Behälterverrechnung. Diese Aufgaben sind in der Regel der Behälterdisposition und -steuerung zugeordnet, die die Planung, Steuerung und



Abbildung 2-3: St. Galler Behälter-Management Modell von Hofmann und Bachmann [Hof-2006, S. 22]

Kontrolle der Behälterkreisläufe übernehmen. Dabei werden in den meisten Unternehmen die Behälterbedarfe in regelmäßigen Zeitabständen neu geplant, um das gebundene Kapital an Behälterbeständen (u. a. bei poolfähigen Behältern) zu reduzieren. Die Steuerung und Überwachung der Behälterkreisläufe, inkl. der Überprüfung der Zielerreichung anhand der Kennzahlen, erfolgen in der Regel noch manuell. Die Behälterverrechnung basiert in vielen Betrieben rein auf den direkten Kosten, indirekte Kostenpositionen (z. B. IT-Infrastrukturkosten) werden häufig aufgrund der schwierigeren Zuordenbarkeit übergangen [Hof-2006, S. 26ff.; Klu-2018, S. 393ff.].

Darüber hinaus müssen für ein erfolgreiches Behältermanagement aufbauorganisatorische Fragestellungen, Verantwortlichkeiten und Anreizsysteme geklärt werden. Diese Themenstellungen sind nach dem St. Galler Behälter-Management Modell innerhalb des Aufgabenbereichs der Behältermanagement-Organisation verankert. Diese definiert Organisationseinheiten, Stellen und Verantwortungsbereiche innerhalb des Unternehmens [Hof-2006, S. 33f.]. Die Abwägung von Outsourcingstrategien und die Auswahl von Finanzierungsformen für die Aufgaben des Behältermanagements sind Teil des Aufgabenfelds der Behälterfinanzierung [Hof-2006, S. 34ff.]. Bspw. werden in der Automobilindustrie Instandhaltungs- und Transportaufgaben häufig an externe Dienstleister vergeben. Die Behälter an sich sind allerdings größtenteils Eigentum des Unternehmens und keine Leihbehälter [Hof-2006, S. 35f.]. Auch eine geeignete IT-Unterstützung des Behälterkreislaufs gilt es durch IT-Systeme und den Einsatz

von Identifikationstechnologien zu realisieren. Die IT-Unterstützung ist ein wesentlicher Stellhebel für die effiziente Steuerung des Behälterkreislaufs. Sie zielt besonders auf eine hohe Erfassungsdichte von Behälterbewegungen bei gleichzeitig geringem operativen Arbeitsaufwand ab [Hof-2006, S. 37ff.]. Auch zählt das St. Galler Behälter-Management Modell die Behälterentwicklung zu den fünf Kernaufgaben. Dabei stehen u. a. die Zusammenarbeit mit der Produktentwicklung und die kontinuierliche Weiterentwicklung der Behälter im Vordergrund. Unternehmen berücksichtigen in der Regel schon beim Produktentwicklungsprozess die Eigenschaften des geplanten Transportbehälters [Hof-2006, S. 43f.].

2.2 Industrie 4.0, IoT und Informationssysteme

„Industrie 4.0 meint im Kern die technische Integration von CPS in die Produktion und die Logistik sowie die Anwendung des Internets der Dinge und Dienste in industriellen Prozessen – einschließlich der sich daraus ergebenden Konsequenzen für die Wertschöpfung, die Geschäftsmodelle sowie die nachgelagerten Dienstleistungen und die Arbeitsorganisation“ [Kag-2013, S. 18].

2.2.1 Definition wichtiger Begrifflichkeiten in Bezug auf das IoT

Das **IoT** ist nicht auf die industrielle Anwendung beschränkt, sondern Teil aller gesellschaftlichen Bereiche. Es beschreibt eine globale Infrastruktur, welche physische und virtuelle Dinge auf Basis von Informations- und Kommunikationstechnologien verbindet und dadurch neuartige Dienste für die Industrie und Gesellschaft ermöglicht. Die zugrundeliegende Kommunikation innerhalb des IoT ist dabei zwischen beliebigen Objekten (physisch und virtuell), an jedem beliebigen Ort und zu jeder beliebigen Zeit möglich. Zur Realisierung verschiedenster Anwendungen wie bspw. CPS nutzt das IoT Kombinationen diverser Identifikations-, Datenerfassungs-, Verarbeitungs- und Kommunikationstechnologien [Int-2012a]. Mithilfe dieser Technologien können die Grundfunktionalitäten von intelligenten Objekten realisiert werden:

- Identifikation,
- Kommunikation,
- Datenerfassung (z. B. über Sensorik),
- Datenspeicherung,
- Informationsverarbeitung,
- Aktorik [Fle-2005, S. 39ff.; Int-2012a].

Intelligente Objekte sind physische Gegenstände, die über ihre ursprünglichen Funktionen hinaus um Grundfunktionalitäten des IoT erweitert wurden [Fle-2005, S. 61ff.].

So werden bspw. Ladungsträger mithilfe von einfachen Radio Frequency Identification (RFID¹⁰)-Transpondern zu intelligenten Behältern, welche als Teil des IoT mit ihrer Umwelt interagieren können. Durch Sensor- und Aktortechnologie können weitere Funktionalitäten, wie die Erfassung von Zuständen oder die Ausführung von Aktionen, ergänzt werden [Kag-2013, S. 85].

Der Begriff **Industrie 4.0** stammt aus Deutschland und hat zum Ziel, die Potenziale des IoT in den Bereichen der Produktionstechnik zu verwirklichen. Neben dieser deutschen Zukunftsstrategie haben mehrere Länder ähnliche Initiativen gestartet, bspw. die USA unter dem Namen Industrial IoT (IIoT) [Lia-2017; Kag-2013, S. 17ff.]. Ein wichtiges Kernelement dieser Strategien bilden CPS. **CPS** sind eingebettete Systeme, die mithilfe von Sensoren Daten erfassen, diese auswerten und speichern und mittels Aktoren auf ihre Umwelt einwirken. Sie können aufbauend auf dieser Datenbasis aktiv oder reaktiv mit der physikalischen oder digitalen Welt interagieren. CPS sind mittels Kommunikationstechnologien miteinander verbunden und können weltweit verfügbare Daten und Dienste nutzen. Für die Kommunikation und Steuerung des CPS, u. a. durch das bedienende Personal, verfügen sie mitunter über mehrere multimodale Mensch-Maschine-Schnittstellen. Durch den Einsatz von CPS werden so neuartige Funktionen, Dienste und Eigenschaften geschaffen [Gei-2012, S. 22]. U. a. transformieren Unternehmen ihre Maschinen, Lagersysteme und Betriebsmittel zu CPS. Kommen CPS in der Produktion zum Einsatz, wird von sogenannten cyber-physischen Produktionssystemen (CPPS) gesprochen. Im Vergleich zu traditionellen Produktionssystemen ermöglichen CPPS deutlich erweiterte Funktionalitäten. So können diese durch die Kommunikation untereinander oder mit intelligenten Produkten situationsbezogene Entscheidungen treffen [Dro-2017, S. 202; Vog-2013].

2.2.2 Informationssysteme und Architekturen

Krcmar definiert Informationssysteme als soziotechnische Systeme, die menschliche und maschinelle Teilsysteme beinhalten und dadurch die „Sammlung, Strukturierung, Verarbeitung, Bereitstellung, Kommunikation und Nutzung von Daten, Informationen und Wissen sowie deren Transformation“ ermöglichen [Krc-2015, S. 22]. So unterstützen diese Systeme Unternehmen gezielt bei der Entscheidungsfindung und erleichtern die Steuerung und Kontrolle von Prozessen. Informationssysteme gliedern sich, wie in Abbildung 2-4 dargestellt, in Mensch und Maschine auf. Der Mensch ist sowohl Nutzer als auch Ersteller des Informationssystems. Die Maschine wird als Anwendung begriffen basierend auf beliebiger Hardware, welche auf Daten zugreift, um interne Prozesse

¹⁰ RFID gehört zu den automatischen Identifikations- und Datenerfassungssystemen (Auto-ID-Systemen). Durch die RFID-Technologie ist es möglich, mit Transpondern versehene Objekte und Personen eindeutig, schnell, berührungslos, gleichzeitig und ohne direkte Sichtverbindung zu identifizieren [Fin-2015, S. 9ff.].

abzuarbeiten. Diese Prozesse wiederum gliedern sich auf in Funktionen und Verbindungen (Schnittstellen) zur Umwelt. Beispiele für Informationssysteme in der Industrie sind Warenwirtschaftssysteme und Produktionssysteme [Krc-2015, S. 22f.].

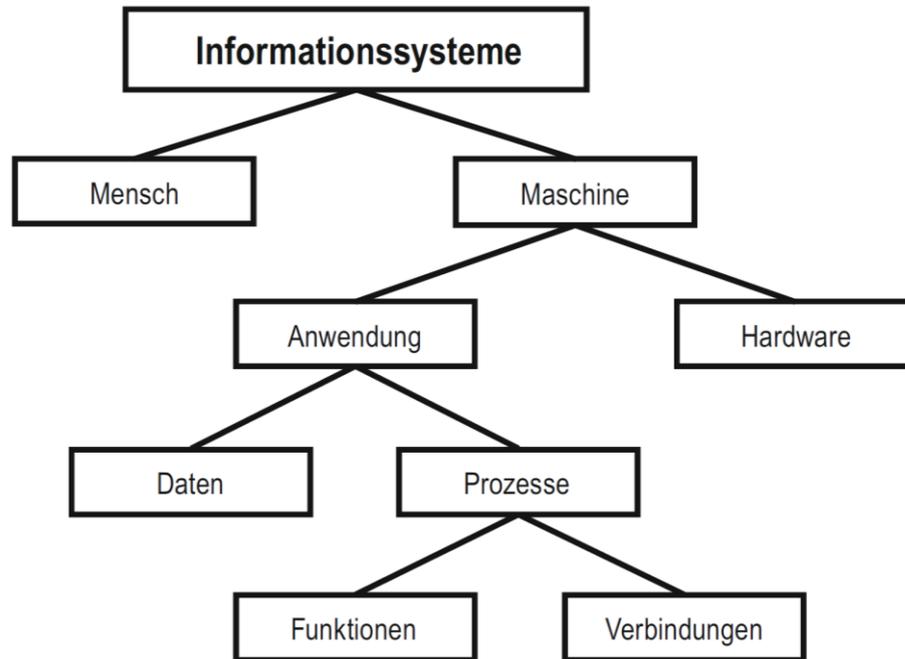


Abbildung 2-4: Aufbau eines Informationssystems nach Krcmar [Krc-2015, S. 22]

Eine Informationssystem-Architektur ist eine abstrakte Beschreibung eines bestehenden oder geplanten Informationssystems. Meist handelt es sich hierbei um eine strukturierende Modellierung. Dabei werden die grundlegenden Strukturen des Informationssystems, u. a. die logischen Komponenten und deren Beziehungen und Eigenschaften, abstrahiert dargestellt [Krc-2015, S. 101; S. 297]. Wenn das Informationssystem computerbasierte Komponenten besitzt, wird die Informationssystem-Architektur in der Literatur oft auch als Information Technology¹¹-Architektur (IT-Architektur) bezeichnet. Ziel der Architektur ist es, eine gemeinsame Kommunikationsgrundlage zu schaffen, auf deren Basis die Gestaltung realer, in Wechselwirkung stehender Entitäten des Informationssystems stattfindet [Der-2009, S. 16ff.; Krc-2015, S. 21].

IT-Architekturen werden in eine statische und eine dynamische Sicht eingeteilt. Die statische Sicht besteht aus der Anwendungsarchitektur, welche sich weiter aufgliedert

¹¹ Der englische Begriff „Information Technology“ wurde bewusst verwendet, da dieser sowohl die Informationstechnik als auch die Informationstechnologie beinhaltet und so die beiden Themengebiete der Informationsverarbeitung zusammenfasst (siehe [Krc-2015, S. 20f.]).

in die fachliche Architektur, die Softwarearchitektur und die System- und Sicherheitsarchitektur:

- Die fachliche Architektur dient zur Strukturierung von Funktionalitäten und Daten der zur Umsetzung angestrebten Geschäftsprozesse. Dabei entsteht u. a. die Datenarchitektur des Informationssystems [Der-2009, S. 20ff.].
- Die Softwarearchitektur legt die Art, die Struktur und das Zusammenwirken der Softwarebausteine fest. Sie ermöglicht eine softwaretechnische Strukturierung des Informationssystems, regelt die Organisation und Interaktion von Softwarebausteinen, definiert Schnittstellen und beinhaltet Informationen, u. a. zur Synchronisation oder zum Datenzugriff einzelner Bausteine [Der-2009, S. 20ff.].
- Die System- und Sicherheitsarchitektur beschreibt die systemnahen Hard- und Softwarekomponenten, welche für den Einsatz des Informationssystems benötigt werden. Dabei werden sowohl der fachlichen Architektur als auch der Softwarearchitektur die jeweils benötigten IT-Infrastrukturelemente wie z. B. Datenbanken oder Firewalls zugeordnet. Auch die Eigenschaften dieser Komponenten und deren Interaktionen werden innerhalb der System- und Sicherheitsarchitektur definiert [Der-2009, S. 20ff.].

Die dynamische Sicht der IT-Architektur entspricht dem Modell des Softwareentwicklungsprozesses (häufig auch Vorgehensmodell bezeichnet) und beschreibt die Artefakte und Aktivitäten, die notwendig sind, um ein Informationssystem ausgehend von der statischen Sicht zu beschreiben, zu erstellen und einzuführen [Krc-2015, S. 298; Der-2009, S. 19ff.].

Eine Referenzarchitektur soll die Entwicklung von Systemen oder Lösungen erleichtern, indem sie Wissen bereitstellt und einen Entwicklungsrahmen vorgibt. Die Inhalte der Referenzarchitektur, welche meist technisch orientiert sind und dabei das Fachwissen der jeweiligen Domäne mit einbeziehen, bilden ein wiederverwendbares Rahmenwerk für die Entwicklung der konkreten IT-Architektur des geplanten Systems [Rei-2018, S. 903]. Dabei bieten Referenzarchitekturen den Entwicklern eindeutige und konsistente Definitionen sowie ein gemeinsames Vokabular, anhand dessen Spezifikationen diskutiert und Optionen verglichen werden können. Sie stellen einen Leitfaden für die Beschreibung von Systemelementen und deren Beziehung und Funktionen bereit [Ind-2019, S. 8]. Laut *Kagermann et al.* ist eine Referenzarchitektur eine notwendige Voraussetzung für die erfolgreiche Implementierung von Industrie 4.0 [Kag-2013, S. 6]. Sie dient als allgemeines Muster für unternehmensübergreifende Produkte und Dienstleistungen. Dabei gibt sie den Rahmen für die Entwicklung, die Integration und den Betrieb relevanter technischer Systeme des IoT vor. Im Kontext von Industrie 4.0 tragen Referenzarchitekturen dazu bei, komplexe Strukturen innerhalb eines

Wertschöpfungsnetzwerks verständlicher darzustellen. So können u. a. Schwachstellen leichter identifiziert werden [Kag-2013, S. 43f.; Tru-2018a, S. 2ff.]. Der aktuelle Stand der Forschung zu Referenzarchitekturen für das IoT wird in Abschnitt 3.3 thematisiert.

2.3 Grundlagen zum Einsatz cloudbasierter Service-Systeme

In den folgenden Unterabschnitten werden die wesentlichen Bestandteile von cloudbasierten Service-Systemen erläutert. Dabei wird genauer auf Service-Systeme, serviceorientierte Architekturen, Cloud-Computing und Berechtigungskonzepte eingegangen.

2.3.1 Service-Systeme und serviceorientierte Architekturen

Services, auch Dienstleistungen oder Dienste genannt, sind Aktivitäten oder Leistungen die von einem Akteur für einen anderen Akteur erbracht werden, um für beide einen Mehrwert zu erzielen [Krc-2015, S. 719f.; Lei-2020, S. 31f.]. Ein Service-System (dt.: Dienstleistungssystem) beschreibt dabei das Zusammenwirken von Akteuren und Ressourcen zur Erbringung dieser Aktivitäten und Leistungen [Lei-2020, S. 10]. So können neuartige Formen kontextbezogener und kooperativer Wertschöpfung realisiert werden. Genau wie bei Informationssystemen handelt es sich bei Service-Systemen um sogenannte soziotechnische Systeme, welche u. a. eine Servicearchitektur, diverse Technologien und Informationen beinhalten. Bei der Auslegung von Service-Systemen müssen drei Schlüsseleigenschaften berücksichtigt werden: die Architektur, die Interaktion und die Ressourcen [Böh-2014]. Dabei beschreibt die Architektur das Wertversprechen des Service-Systems mithilfe einer Kombination aus Aktivitäten, Akteuren und Ressourcen. Die Schlüsseleigenschaften Interaktion und Ressourcen beinhalten die Interaktionsformen des Service-Systems mit seiner Umwelt und den Zugriff und die Nutzung von Ressourcen (Produktionskapazitäten, IT-Infrastrukturen, etc.) [Alt-2011; Böh-2014].

Für diese Arbeit von Bedeutung sind IT-basierte Dienstleistungen, die eine informationslogistische Leistung bereitstellen. In Verbindung mit Protokollen und Formaten des Internets werden IT-basierte Dienste auch Webservices genannt. Webservices sind Softwarekomponenten, die ihre Funktionalität als Dienstleistung über eine rein maschinenauswertbare Schnittstelle bereitstellen und durch Kombination und Interaktion mit weiteren Webservices komplexere Funktions- bzw. Dienstleistungsumfänge abbilden können [Krc-2015, S. 720]. Dabei haben Webservices selbst keine eigene Benutzeroberfläche, wodurch der Endnutzer nur indirekt mit Webservices über entsprechende Visualisierungen interagieren kann [Mas-2009, S. 52f.].

Das Anbieten, Suchen und Nutzen von Services über ein Netzwerk kann mithilfe einer sogenannten serviceorientierten Architektur (SOA) umgesetzt werden [Mel-2010, S. 9]. Laut der Definition von *Melzer et al.* ist eine SOA „eine Systemarchitektur, die vielfältige, verschiedene und eventuell inkompatible Methoden oder Applikationen als wiederverwendbare und offen zugreifbare Dienste repräsentiert“ [Mel-2010, S. 13]. Durch diesen Aufbau können die Dienste plattform- und sprachenunabhängig genutzt werden [Mel-2010, S. 13].

Dem folgend versteht *Krcmar* SOA als ein Paradigma, welches beschreibt, wie Services durch die Kommunikation von lose gekoppelten Softwarekomponenten innerhalb eines Netzwerks angeboten werden [Krc-2015, S. 379]. Die lose Kopplung innerhalb einer SOA ermöglicht es, dass Dienste und Anwendungen untereinander frei kommunizieren und sich gegenseitig einbinden können. So können sich dynamisch mehrere Dienste verbinden, um Nutzeranfragen zu bearbeiten. Dies bedeutet auch, dass bei der Erstellung des Programms nicht unbedingt bekannt ist, welche Dienste auf welche Art und Weise zur Laufzeit aufgerufen und eingebunden werden [Mel-2010, S. 11]. Die Plattformunabhängigkeit von SOA erlaubt außerdem die Interoperabilität von Diensten und Nutzern bei Verwendung von unterschiedlichen Programmiersprachen und Plattformen [Bau-2011, S. 20]. Neben der losen Kopplung und der Plattformunabhängigkeit sind über ein Netzwerk verteilte Dienste und eine prozessorientierte Struktur weitere Eigenschaften einer SOA. Dabei setzt die SOA die Verwendung von offenen Standards, eingebauter Sicherheit und Einfachheit voraus. Die Einfachheit beschreibt dabei die Forderung nach unkompliziertem und schnellem Austausch oder Zusammenetzen von verschiedenen Diensten, um gewünschte Funktionalitäten zu erzielen. So lassen sich auch von unbekanntem Anbietern programmierte Dienste netzwerkweit nutzen [Mel-2010, S. 11ff.].

Die für den Einsatz einer SOA benötigten Aufgaben werden den drei Rollen Anbieter, Nutzer und Vermittler zugeordnet (siehe Abbildung 2-5) [Mel-2010, S. 14]. Der Anbieter eines Dienstes stellt diesen über eine von ihm betriebene Plattform innerhalb des Netzwerks zur Verfügung und registriert seinen Dienst im Dienstverzeichnis. Die Registrierung ist notwendig, damit der Nutzer alle innerhalb des Netzwerks angebotenen Dienste nach seinen benötigten Umfängen durchsuchen kann. Der Anbieter hat zusätzlich die Aufgabe die Sicherheit der Plattform und des Dienstes zu gewährleisten. Dabei überprüft er die Identität des Nutzers (Authentifizierung) und dessen Berechtigungen in Bezug auf den angeforderten Dienst [Mel-2010, S. 16]. Um die Suche nach benötigten Diensten so einfach wie möglich zu gestalten, sind alle für den Nutzer verfügbaren Dienste im Dienstverzeichnis (engl. Registry) hinterlegt. In einem Netzwerk können auch mehrere Verzeichnisse existieren, die bspw. nur für bestimmte Nutzergruppen zugänglich sind [Mel-2010, S. 16f.]. Der Dienstanutzer durchsucht folglich das

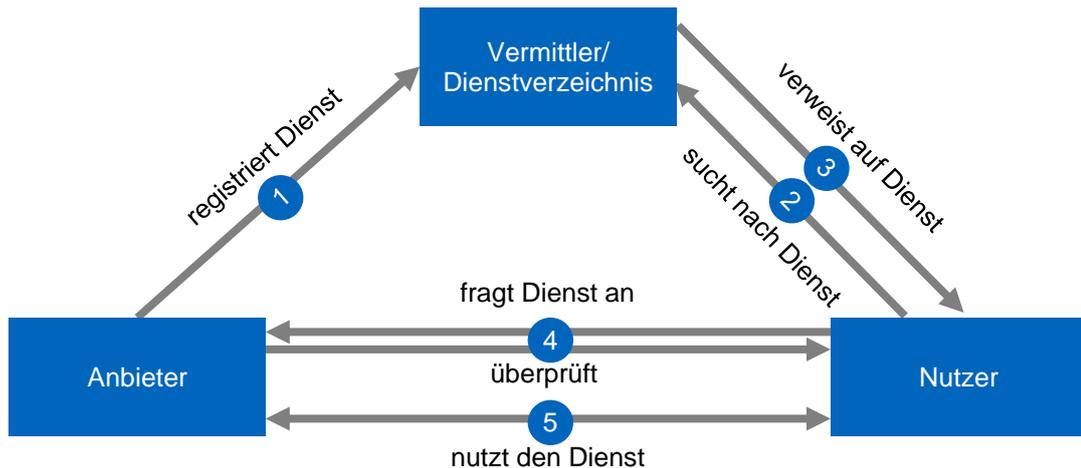


Abbildung 2-5: Aktionen und Rollen innerhalb einer SOA [in Anlehnung an Mel-2010, S. 14].

Dienstverzeichnis nach den gewünschten Funktionalitäten bzw. Umfängen. Findet er einen passenden Dienst, kann er diesen mit dem Verweis aus dem Verzeichnis direkt zur Laufzeit aufrufen. Den erfolgreichen Zugriff auf einen Dienst durch einen Nutzer nennt man auch Bindung. Kennen sich Anbieter und Nutzer bereits, wird der Schritt über das Verzeichnis oft umgangen. So können Ressourcen eingespart und die Laufzeit verringert werden. Gleichzeitig reduziert sich aber die Flexibilität einen entsprechend gleichwertigen Dienst aus dem Verzeichnis auszuwählen, da die Suche im Dienstverzeichnis entfällt [Mel-2010, S. 17f.; Krc-2015, S. 379f.].

Auch das Cloud-Computing baut auf dem Paradigma der SOA auf und ermöglicht so die Nutzung von virtualisierten IT-Infrastrukturen, Plattformen und Anwendungen als Dienste [Bau-2011, S. 19]. Diese finden ihren Einsatz besonders bei cloudbasierten Service-Systemen, weshalb im nächsten Unterabschnitt auf die Grundlagen von Cloud-Computing näher eingegangen wird.

2.3.2 Cloud-Computing

Cloud-Computing ist ein Bereitstellungsmodell von IT-Ressourcen (bspw. IT-Infrastruktur, Anwendungen oder Daten) in Form von virtualisierten Diensten über das Internet. Die Ressourcen können dabei von mehreren Anbietern innerhalb einer Cloud-Architektur bereitgestellt werden [Böh-2009, S. 8]. Eine Cloud-Architektur besteht in der Regel aus virtualisierten Servern, Datenspeichern, Netzwerken und Software-Applikationen. Diese werden in einem gemeinsamen Pool zusammengefasst, verwaltet und dem Nutzer bedarfsgerecht zur Verfügung gestellt. Auch eine dynamische Skalierung der zugeteilten Ressourcen während des Einsatzes ist mit Cloud-Computing möglich [Bau-2011, S. 9f.]. Laut dem *National Institute of Standards and Technology* (NIST) kann das Cloud-Computing anhand von fünf essenziellen Eigenschaften beschrieben werden [Mel-2011]:

- *On-Demand self-service*: Der Anwender kann die von ihm genutzten virtualisierten Ressourcen und Dienste, wie bspw. Rechenkapazitäten oder Netzwerkspeicher, dem aktuellen Bedarf anpassen, ohne dass eine menschliche Interaktion mit den einzelnen Dienst Anbietern nötig ist.
- *Broad network access*: Alle Funktionalitäten und Ressourcen des Cloud-Computings sind über das Internet verfügbar. Dabei erfolgt der Zugriff über standardisierte Protokolle und Mechanismen, wodurch ein einfacher, standortunabhängiger Zugang, bspw. über Smartphones, Tablets oder Laptops, ermöglicht wird.
- *Resource pooling*: Die Ressourcen des Cloud-Anbieters werden in einem Pool zusammengefasst, um daraus mehrere Kunden gleichzeitig mit physischen und virtuellen Ressourcen versorgen zu können. Sie können je nach Kundenbedarf dynamisch neu zugewiesen werden. Demzufolge kennt der Kunde in der Regel den genauen Standort der bereitgestellten Ressourcen nicht.
- *Rapid elasticity*: Kapazitäten können dynamisch bereitgestellt und wieder entzogen werden. Dies erlaubt eine schnelle, teilweise automatisierte, bedarfsgerechte Skalierung von Ressourcen. Bei Anwendern kann der Eindruck entstehen, dass verfügbare Kapazitäten scheinbar unbegrenzt, zu jeder beliebigen Zeit und in beliebiger Menge, bereitstehen.
- *Measured service*: Da Cloud-Systeme automatisch die Ressourcennutzung steuern und optimieren, müssen die vom Anwender tatsächlich genutzten Ressourcen überwacht und dokumentiert werden. Dies erfolgt über eine oder mehrere messbare Größen (z. B. genutzte Rechenkapazität, Speichergröße, Bandbreite oder aktive Benutzerkonten). So kann eine transparente und nutzungsabhängige Abrechnung der Dienste erfolgen [Mel-2011].

Dementsprechend zielt das Cloud-Computing darauf ab, die Basisfunktionalitäten Verarbeiten und Speichern, in Abhängigkeit des jeweiligen Kundenbedarfs, flexibel über das Internet bereitzustellen [Krc-2015, S. 723]. *Böhm et al.* spricht konkret von einem Outsourcing von IT-Leistungen an externe Dienstleister im Sinne der Dienstleistungsorientierung zur Realisierung von Kosten-, Qualitäts-, Flexibilitäts- und Kompetenzvorteilen (Everything as a Service) [Böh-2009]. Dabei können beim Cloud-Computing drei weitverbreitete Servicemodelle unterschieden werden: Infrastructure as a Service, Platform as a Service und Software as a Service (siehe Abbildung 2-6). Die einzelnen Modelle bauen dabei aufeinander auf und können jeweils die Dienste des darunter liegenden Modells nutzen [Len-2009]. Im Folgenden werden die einzelnen Modelle des Cloud-Computings genauer erläutert.

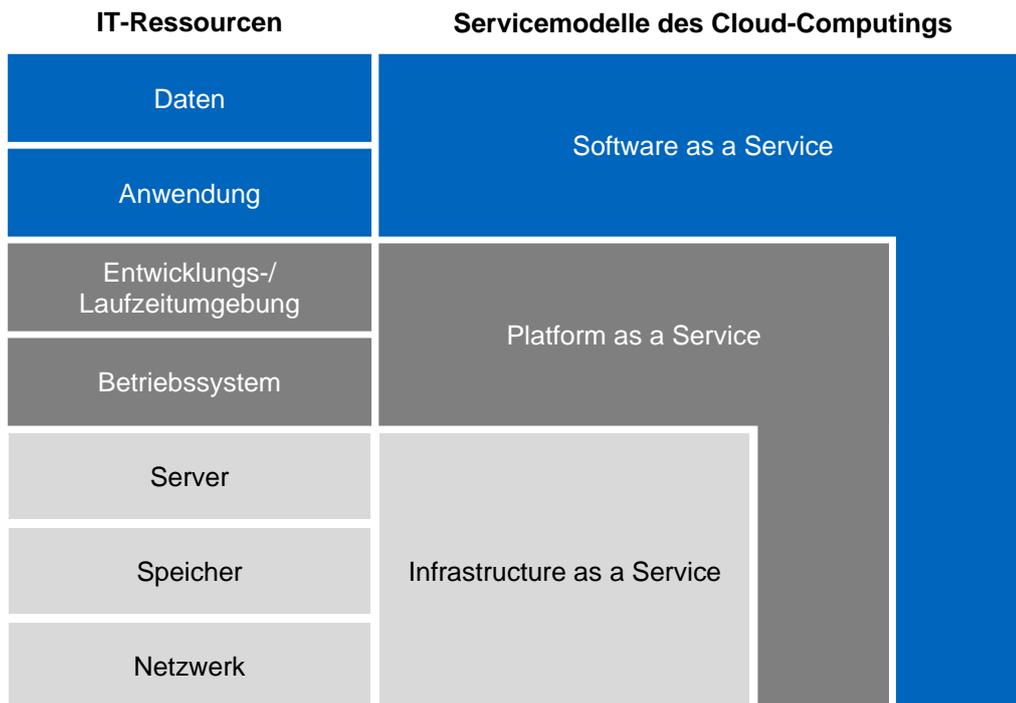


Abbildung 2-6: Servicemodelle des Cloud-Computings [in Anlehnung an Len-2009; You-2008]

Bei dem Modell Infrastructure as a Service (IaaS) werden dem Nutzer Infrastrukturelemente in Form von virtualisierten Servern, Netzkapazitäten, Kommunikationsgeräten, Rechenkapazitäten oder Datenspeichern über das Internet zur Verfügung gestellt [Krc-2015, S. 724]. Diese können über eine Benutzerschnittstelle angefordert und bedient werden. Die primären Funktionen, die so umgesetzt werden, sind das Starten und Stoppen einzelner Ressourcen, die Installation und Verwaltung von Betriebssystemen, die Einrichtung einer Netzwerktopologie und die Verteilung der Kapazitäten. Welche Betriebssysteme genutzt werden und wie die Anwendungen auf die Ressourcen verteilt sind, liegt beim Anwender selbst. Zusätzlich bieten einige Cloud-Anbieter bereits innerhalb der IaaS-Stufe Berechnungs-, Netzwerkdienste und Speicherfunktionalitäten an [Len-2009].

Platform as a Service (PaaS), bietet dem Anwender eine Entwicklungs- und Laufzeitumgebung, in denen Softwareanwendungen in verschiedenen Programmiersprachen entwickelt, ausgeführt und getestet werden können. Diese Form von Cloud-Computing richtet sich überwiegend an Softwareentwickler und bietet diesen typische Funktionalitäten der Softwareentwicklung, wie Compiler, die Einbindung von Bibliotheken oder die Versionskontrolle an. Die Verwaltung der Betriebssysteme und Ressourcen, auf denen gearbeitet wird, übernimmt in diesem Fall allerdings der PaaS-Anbieter [Len-2009; Krc-2015, S. 727]. Auch cloudbasierte IoT-Plattformen sind dem Servicemodell PaaS zuzuordnen. Diese Cloud-Plattformen sind auf Funktionalitäten zur Integration

von IoT-Geräten spezialisiert und ermöglichen so eine einfache Anbindung intelligenter Objekte, bspw. über eine Weboberfläche [Gut-2018].

Bei Software as a Service (SaaS) kann der Endkunde die fertige Anwendung über das Internet direkt verwenden, ohne physische Ressourcen für deren Ausführung bereitstellen zu müssen. Die Installation, Anpassung, Wartung und den Betrieb der Anwendung übernimmt dabei der Anbieter. Dieses Modell ermöglicht es dem Endkunden bspw. über seinen Webbrowser Anwendungen wie Microsoft Office oder Google Earth in vollem Umfang zu nutzen, ohne die Software lokal installieren zu müssen [Len-2009; Krc-2015, S. 728].

Darüber hinaus finden sich in der Literatur noch weitere Modelle zum Cloud-Computing, z. B. Human as a Service (Erweiterung des SaaS-Modells um die Ressource Mensch) oder Storage as a Service (oft auch Cloud Storage genannt) [Krc-2015, S. 723ff.; Len-2009; Bau-2011, S. 39ff.].

Unabhängig von der Ausprägung des Servicemodells werden drei Bereitstellungsarten unterschieden: Public, Private und Hybride. Bei einer Public Cloud sind Anbieter und Nutzer nicht Teil derselben Organisation. Die Cloud-Dienste des Anbieters sind öffentlich zugänglich und können meist direkt über eine Webseite im Internet gebucht werden. So kann der Anwender die gewünschten Cloud-Umfänge selbst auswählen und bezahlt diese nutzungsbasiert. Bei einer Private Cloud gehören hingegen Anbieter und Nutzer derselben Organisation an. Dies hat zur Folge, dass auch die physischen IT-Ressourcen selbst bereitgestellt werden müssen. Ein Hauptgrund für den Einsatz von Private Clouds sind Sicherheitsbedenken bzgl. sensibler Daten (z. B. Gesundheitsdaten oder Patententwürfe). Diese können auf einer Private Cloud vor unerlaubtem Zugriff besser geschützt werden. Ein weiterer Grund für die Verwendung einer Private Cloud können gesetzliche, firmeninterne oder vertragliche Regularien sein, die es erfordern, Daten nur innerhalb der Organisationsgrenzen zu speichern. Die Schnittstellen zu den Diensten der Private Cloud oder Public Cloud werden in der Regel gleich ausgelegt, um Anwendungen bei Bedarf vom jeweils anderen Bereitstellungsmodell einfacher übertragen zu können. Die Kombination aus den beiden Bereitstellungsarten nennt man Hybride Cloud. Ressourcenbedingt können so Lastspitzen, bestimmte Funktionsumfänge oder Dienste von der Private Cloud in die Public Cloud ausgelagert werden. Kritische Funktionen und Daten hingegen verbleiben auf der Private Cloud [Bau-2011, S. 27ff.].

2.3.3 Berechtigungskonzepte für cloudbasierte Service-Systeme

Die durch das Cloud-Computing geschaffenen neuen Möglichkeiten der Auslagerung von IT-Ressourcen bedeuten auch für die IT-Sicherheit eine besondere Herausforderung, da der Cloud-Anbieter physisch im Besitz von Anwendungen und Daten ist. Für den Zugang zur Cloud müssen deshalb entsprechende Berechtigungskonzepte erstellt werden [Tso-2017, S. 2f.]. Der Begriff „Berechtigung“ beschreibt dabei die Befugnis einer Identität auf Ressourcen (z. B. Anwendungen, Daten und Maschinen) zuzugreifen oder diese ausführen zu können. Eine Identität, in der Literatur auch oft als Nutzer bezeichnet, wird durch die Gesamtheit der ihr zugeordneten Eigenschaften definiert und ist so eindeutig identifizierbar. Neben natürlichen Personen können auch Maschinen oder IT-Systeme eine Identität darstellen. Einer Identität können Berechtigungen für Ressourcen zugeordnet werden [Tso-2017, S. 27ff.].

Generell besteht Berechtigungen aus zwei Teilen: die Definition der Ressource, für die die Berechtigung gilt und die Operation, die in Bezug auf die Ressource freigegeben oder gesperrt werden soll. Solche Operationen sind u. a. Ausführen (execute), Lesen (read), Öffnen (open) und Löschen (delete). Ein Objekt (z. B. eine Abfüllanlage) kann als einzelne Ressource beschrieben werden, wodurch eine dafür berechtigte Identität uneingeschränkten Zugriff auf alle Funktionen und Inhalte hätte. Alternativ kann das Objekt auch durch mehrere Ressourcen (z. B. auf Ebene der Ventile und Pumpen) beschrieben werden. Dies hat den Vorteil, dass Inhalte und Funktionen einzeln freigegeben werden können [Tso-2017, S. 3ff.].

Grundlage für die erfolgreiche Anwendung von Berechtigungskonzepten ist die Authentifikation von Identitäten, welche vor der Überprüfung von Berechtigungen benötigt wird. Durch die Authentifikation wird die anfragende Identität kontrolliert und verifiziert [Ben-2006, S. 3f.]. Nach erfolgreicher Authentifizierung erfolgt die eigentliche Zugangskontrolle, die sogenannte Autorisierung, bei der auf Basis des Berechtigungskonzepts, also basierend auf vordefinierten Regeln oder Attributen, der Zugang der jeweiligen Identität zur angefragten Ressource überprüft wird [Ben-2006, S. 3f.]. Im Folgenden wird ein Überblick über die wichtigsten Berechtigungskonzepte gegeben.

Direkte Beziehung zwischen Identität und Ressource

Eine einfache Berechtigungsstruktur ist die direkte Zuordnung von Identitäten zu Ressourcen. Bei diesem Konzept wird jede einzelne Identität den verschiedenen Ressourcen zugeordnet. Dies hat den Vorteil, dass für jede Ressource problemlos nachvollzogen werden kann, welche Identitäten Zugriffsberechtigungen haben. Dieses Vorgehen kann allerdings bei größeren Unternehmensstrukturen schnell zu einem erhöhten Verwaltungsaufwand führen [Tso-2017, S. 41ff.].

Discretionary Access Control

Discretionary Access Control (DAC) arbeitet mit einer Nutzerzugangsliste (Access Control List, ACL), welche den Zugriff auf eine Ressource regelt. In dieser Liste ist definiert, welche Identität in welchem Umfang Operationen mit der entsprechenden Ressource durchführen kann. Bei DAC legt der Eigentümer einer Ressource fest, welche Berechtigungen eine Identität bekommt und hält diese in der ACL schriftlich fest [San-1994].

Mandatory Access Control

Bei Mandatory Access Control (MAC) handelt es sich um eine ressourcenorientierte Zugriffskontrolle. Dabei werden sowohl die Ressourcen als auch die Identitäten in Schutzklassen eingeteilt. Anhand der Schutzklassen wird anschließend der Zugriff geregelt. Dabei kann eine Identität nur auf Ressourcen zugreifen, die sich in derselben oder in einer niedrigeren Schutzklasse befinden. Laut *Tsolkas und Schmidt* unterscheiden die meisten Unternehmen und Organisationen dabei nur vier Schutzklassen: hoch, mittel, niedrig und öffentlich [Tso-2017, S. 165f.].

Role-based Access Control

Das grundlegende Konzept von Role-based Access Control (RBAC), das sogenannte Flat RBAC ($RBAC_0$), besteht aus drei Komponenten: der Rolle (eng. role, R), der Identität (eng. user, U) und der Berechtigung (eng. permission, P) (siehe Abbildung 2-7). Dabei ist die Rolle das Bindeglied zwischen der Identität und der Berechtigung und regelt die Zugriffsentscheidung. Die Zuordnung der Identitäten zu Rollen (eng. user assignment, UA) und die Zuordnung von Berechtigungen zu Rollen (eng. permission assignment, PA) sind dabei n:n-Beziehungen. So reduziert sich die Anzahl der Zuweisungen von Berechtigungen, da nicht jeder Identität einzeln die Berechtigungen gegeben bzw. entzogen werden müssen. Auch bei erforderlichen Änderungen bleibt $RBAC_0$ übersichtlicher, da nur die Berechtigungen der Rolle angepasst werden und sich die Änderungen direkt auf alle Identitäten, welche diese Rolle innehaben, auswirken. Auch die Session (S), also die aktive Sitzung einer Identität, die sich am System angemeldet hat, wird oft in der Literatur als weitere Komponente bei $RBAC_0$ genannt. Diese ist nach *Sandhu et al.* aber nicht explizit Teil des $RBAC_0$, da die Identität bei $RBAC_0$ innerhalb einer Session ohne weitere Einschränkungen immer eine Teilmenge der ihm zugeordneten Rollen aktivieren oder deaktivieren kann. So entsteht für die Einführung



Abbildung 2-7: Schematische Darstellung von $RBAC_0$ [in Anlehnung an San-2000, S. 50]

der Komponente Session bei $RBAC_0$ kein direkter Vorteil. Hingegen für weiterführende Ausprägungen, die das $RBAC_0$ -Konzept um zusätzliche Elemente erweitern, kann die Komponente Session sinnvoll eingesetzt werden [San-2000, S. 50f.; San-1996, S. 41f.]. Im Folgenden sollen deshalb die weit verbreiteten Konzepte Hierarchical RBAC ($RBAC_1$) und Constrained RBAC ($RBAC_2$) beschrieben werden.

Das Hierarchical RBAC ergänzt das Basiskonzept um eine sogenannte Rollenhierarchie, welche die Vererbung von Berechtigungen ermöglicht. So können bspw. die Berechtigungen der Rolle R_1 der Rolle R_2 vererbt werden, wodurch R_1 zu einer Teilmenge von R_2 wird. In den meisten Unternehmen folgt der Aufbau der Rollenhierarchie der Organisationsstruktur, wodurch etwa leitende Angestellte automatisch die Berechtigungen der untergeordneten Mitarbeiter vererbt bekommen. Dies führt zu einer Reduzierung des Aufwands bei der Zuordnung von Berechtigungen [San-2000, S. 52ff.; San-1996, S. 42f.]. Das Constrained RBAC erweitert das Grundkonzept ($RBAC_0$) um die Funktionstrennung. So werden bei der Vergabe von Rollen an Identitäten zusätzlich vorhandene Einschränkungen überprüft, um Interessenskonflikte zu vermeiden. So kann bspw. das gleichzeitige Übernehmen der Rollen „Antragsteller“ und „Antrag-Genehmiger“ vermieden werden. Die Funktionstrennung kann dabei sowohl zum Zeitpunkt des Anlegens einer Rolle statisch (Rolle ist einer betroffenen Identität nicht zuordenbar) oder dynamisch bei der Nutzung (beide Rollen sind einer Identität zugeordnet, aber nur eine Rolle je Session ist aktiv nutzbar) umgesetzt werden [San-2000, S. 54ff.; Tso-2017, S. 75ff.]. Generell lässt sich für RBAC-Konzepte der Vorteil erkennen, dass sich die Berechtigungen mithilfe der Rollen von den Identitäten entkoppeln lassen. Aufgrund des statischen Charakters von RBAC kann es allerdings dazu kommen, dass bei einer größeren Anzahl von Zugriffsregelungen eine Vielzahl von Rollen erstellt werden muss [Tso-2017, S. 81].

Attribute Based Access Control

Attribute Based Access Control (ABAC) ist ein Zugriffskontrollverfahren, bei dem die Anfrage einer Identität für eine Ressource basierend auf den Attributen (*Attr*) der Identität, den Attributen der Ressource, den Umgebungsbedingungen und definierten Richtlinien (in Bezug auf Attribute und Bedingungen, eng. *policy*) gewährt oder verweigert wird (siehe Abbildung 2-8). Attribute sind dabei die Eigenschaften der jeweiligen Instanz (Identität, Ressource oder Umwelt), die als Name-Wert-Paar (z. B. Jahr:2021) angegeben werden [Hu-2014, S. 7ff.]. Diese können sowohl statisch (z. B. Geburtsjahr) als auch dynamisch (z. B. aktuelles Datum) sein. So basiert die Entscheidungsfindung auf einer Kombination aus statischen bzw. dynamischen Attributen und fest definierten Regeln. Dies ermöglicht eine hohe Flexibilität, da auch unbekannte Identitäten durch eine passende Attributkombination Zugang zu den gewünschten Ressourcen

cen bekommen. Dabei erlaubt ABAC im Gegensatz zum tendenziell statischen Konzept RBAC eine multikriterielle Entscheidungsfindung, welche sich dynamisch an die jeweilige Situation anpasst. So kann u. a. basierend auf dem aktuellen Standort der Identität und der Ressource der Zugriff reguliert werden [Hu-2014, S. 5ff.]. Der Nachteil bei ABAC ist, dass verhältnismäßig viele Richtlinien benötigt werden, um den Zugang zu Ressourcen zu regeln. Bei vielen berechtigungssteuernden Attributen, welche sich unter Umständen zudem noch dynamisch verhalten, wird die Bestimmung, welchen Rechteumfang eine einzelne Identität tatsächlich besitzt, sehr komplex [Tso-2017, S. 80].

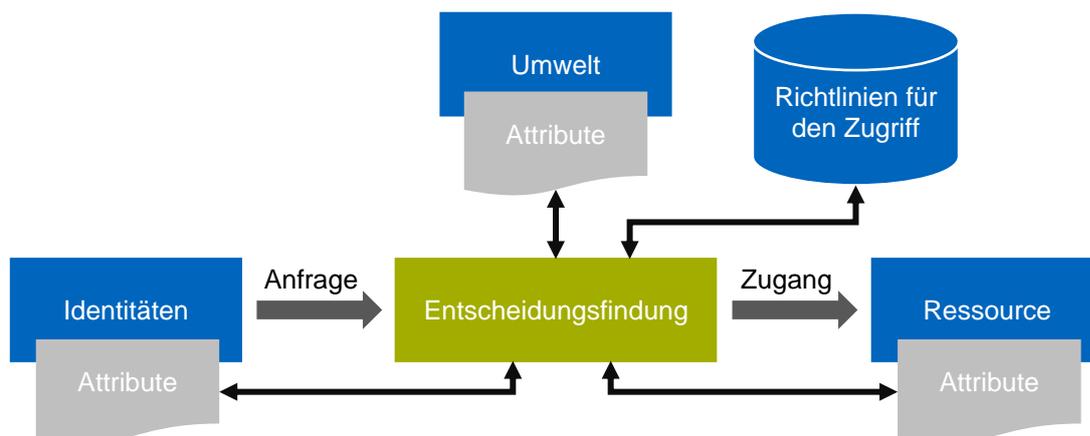


Abbildung 2-8: Grundlegender Aufbau von ABAC [in Anlehnung an Hu-2014, S. 8]

Um die jeweiligen Nachteile von RBAC und ABAC auszugleichen, haben sich in der Literatur einige Kombinationen der beiden Konzepte etabliert [Tso-2017, S. 81]:

- *RBAC-A dynamic roles*: Bei diesem Ansatz, bestehend aus dynamischen Rollen, wird basierend auf den Attributen (der Identität, der Ressource und der Umwelt) bestimmt, welche Rolle der Identität zugeordnet wird. Die einzelnen Berechtigungen für die jeweiligen Ressourcen sind dabei den Rollen zugeordnet [Tso-2017, S. 81].
- *RBAC-A attribut centric*: Der attributdominierte Ansatz ordnet den Identitäten die einzelnen Rollen als zusätzliches Attribut zu. Die Zugriffsregelung erfolgt hierbei nicht nach dem RBAC-Konzept, sondern rein nach dem ABAC-Konzept, da der Rolle selbst keine Berechtigungen zugeordnet sind [Tso-2017, S. 81].
- *RBAC-A role centric*: Beim rollendominierten Ansatz hingegen erfolgt die Zuordnung der Berechtigungen nach dem RBAC-Modell, wobei die einzelnen Berechtigungen der Rolle dynamisch, je nach aktuellem Attributwert, noch weiter reguliert werden können [Tso-2017, S. 81].

2.4 LPWAN als Informations- und Kommunikationstechnologie

Informations- und Kommunikationstechnologien (IuK-Technologien) bilden die Grundlage für eine erfolgreiche Umsetzung einer IT-Architektur, indem sie die Basisfunktionalitäten Speichern, Verarbeiten und Kommunizieren bereitstellen [Krc-2015, S. 24]. Im Rahmen dieser Arbeit werden sogenannte Low Power Wide Area Network-Technologien (LPWAN-Technologie), welche die Kommunikation zwischen mehreren Objekten ermöglichen, eingesetzt. Im Folgenden werden deshalb LPWAN-Technologien im Allgemeinen und die Long Range Wide Area Network-Technologie (LoRaWAN-Technologien) im Speziellen beschrieben.

2.4.1 Grundlagen von LPWAN

LPWAN ist ein Sammelbegriff für Funktechnologien, die für IoT-Anwendungen optimiert sind. Dabei spiegeln sich die Vorteile von LPWAN-Technologien im Namen wider: extrem niedriger Energiebedarf der Sender bei gleichzeitig hohen Reichweiten der Datenübertragung (bis zu mehreren Kilometern). Dies ermöglicht eine große Anzahl von Sendern, welche über ein weites Gebiet verteilt sind. Um diese Vorteile realisieren zu können, kommt es zu Einbußen bei der Datenrate (teilweise nur geringe zweistellige kBit/s) und der Latenz (Sekunden bis Minuten) [Raz-2017, S. 855f.]. In Abbildung 2-9 ist die LPWAN-Technologie in einem vereinfachten Diagramm anhand ihrer Datenrate und Reichweite neben anderen gängigen Funktechnologien eingeordnet.

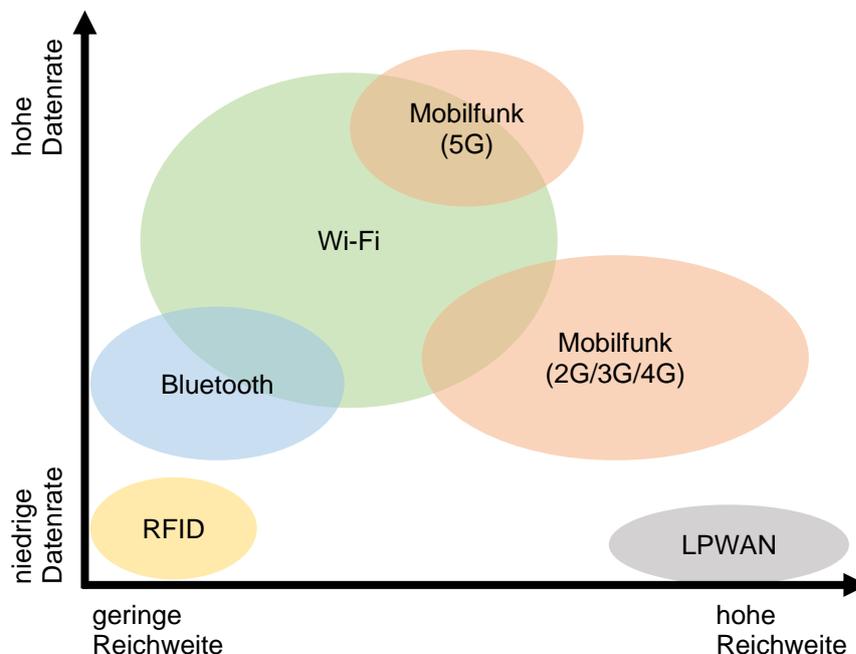


Abbildung 2-9: Schematische Einordnung gängiger Funktechnologien anhand ihrer Reichweite und Datenrate [in Anlehnung an Ste-2019]

Trotz der großen Anzahl von verschiedenen LPWAN-Technologien, gibt es einige Leitlinien, die für alle gelten:

- niedriger Energieverbrauch während des Betriebs der Sender,
- Begrenzung des Betriebszeitfensters (Sender sind nur aktiv, wenn Daten gesendet oder empfangen werden),
- geringe Kosten für den Einsatz von LPWAN (Sender, Infrastruktur, ...),
- einfache Realisierbarkeit bzgl. Implementierung und Erweiterungen der Infrastruktur,
- verschlüsselter Datentransfer innerhalb des Netzwerks,
- einfach skalierbares Netzwerk auf eine Vielzahl von Sendern [Bar-2016; Raz-2017, S. 3ff.].

Aufbauend auf diesen Leitlinien haben sich einige proprietäre Technologien entwickelt. Unter diesen Technologien befinden sich u. a. SigFox, LoRa (Long Range), Ingenu, Telensa und Qowisio. Neben den patentierten Technologien arbeiten aktuell mehrere Organisationen, wie das European Telecommunications Standards Institute (ETSI), das 3rd Generation Partnership Project (3GPP), die Internet Engineering Task Force (IETF) und das Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) an offenen Standards für LPWAN-Technologien. Darüber hinaus wurden Industrieanalysen, wie die Weightless SIG, die LoRa Alliance und die DASH7 Alliance ins Leben gerufen, um neue LPWAN-Standards zu fördern [Raz-2017, S. 861ff.]. Tabelle 2-1 gibt einen Überblick über die aktuellen LPWAN-Standards und deren entwickelnde Organisationen.

Tabelle 2-1: *Übersicht über Organisationen die LPWAN-Standards entwickeln [in Anlehnung an Raz-2017, S. 863].*

Organisation	LPWAN-Standard
IEEE	802.15.4k 802.15.4g 802.11: LRLP (Long Range Low Power)
3GPP	eMTC (enhanced Machine-type Communications) EC-GSM (Extended Coverage Global System for Mobile Communications) NB-IoT (NarrowBand IoT)
ETSI	LTN (Low Throughput Networks)
IETF	6LPWA/LP-WAN (Low Power Wide Area/Network)
Weightless SIG	Weightless-W/N/P
LoRa Alliance	LoRaWAN (Long Range Wide Area Network)
DASH7 Alliance	DASH7

Einige der genannten patentierten Technologien wurden und werden an diese Standards angepasst. U. a. wurden aufbauend auf der geschützten LoRa-Technologie die Spezifikationen der Systemarchitektur unter dem Namen LoRaWAN veröffentlicht [Raz-2017, S. 861ff.]. Im folgenden Unterabschnitt werden einige wichtige Begrifflichkeiten in Zusammenhang mit LoRaWAN kurz erklärt. Ebenso wird auf die Funktionsweise und den Aufbau von LoRaWAN genauer eingegangen.

2.4.2 LoRaWAN als Vertreter von LPWAN-Technologien

LoRaWAN ist ein Protokoll für die Vermittlungsschicht (Layer III) des OSI-Modells¹² (siehe Abbildung 2-10), welches 2015 von der Non-Profit-Organisation LoRa Alliance veröffentlicht wurde und seither von dieser gefördert wird. Basierend auf LoRaWAN können private Netzwerke im lizenzfreien Frequenzspektrum, im sogenannten Industrial Scientific and Medical-Band (ISM-Band¹³), aufgebaut werden. In Europa nutzt LoRaWAN die Frequenzen von 863 MHz bis 870 MHz. Dabei wird die von Semtech patentierte Funkmodulationstechnologie LoRa (Long Range), welche die Kommunikation in der physikalischen Schicht (Layer I) und die Flusssteuerung in der Sicherungsschicht (Layer II) regelt, eingesetzt [Sem-2018, S. 3; Sem-2015a, S. 4]. LoRa basiert auf der sogenannten Chirp-Spread-Spectrum-Modulation, einer Breitbandtechnik mit frequenzvariablen sinusförmigen Impulsen, welche besonders robust gegenüber Störungen, Doppler- und Mehrwegeeffekten ist [Aug-2016, S. 5].

Schicht	Benennung	Aufgabenbeispiel	
Layer VII	Anwendungsschicht	Interaktion mit Software	
Layer VI	Darstellungsschicht	Kodierung/Konvertierung	
Layer V	Kommunikationsschicht	Aufbau/Kontrolle Datenstrom	
Layer IV	Transportschicht	Sicherungsmechanismen	
Layer III	Vermittlungsschicht	Routing/Wegfindung	} LoRaWAN
Layer II	Sicherungsschicht	Fluss- und Zugriffsregelung	
Layer I	Physikalische Schicht	Signalform und Frequenz	} LoRa

Abbildung 2-10: Einordnung von LoRaWAN in die Schichten des OSI-Modells [in Anlehnung an Sem-2018, S. 2; Sch-2019, S. 4]

¹² Für die Kommunikation zwischen Endgeräten wurde ein Referenzmodell, das Open Systems Interconnection (OSI)-Modell, entwickelt. Es regelt die Kommunikation zwischen Computern und Endgeräten und teilt diese in sieben Schichten auf. Die einzelnen Schichten sind in sich abgeschlossen und haben einen genau spezifizierten Aufgabenbereich. So kann jede Schicht einzeln implementiert und weiterentwickelt werden. Die unteren Schichten eins bis vier regeln die Datenübertragung, die Schichten fünf bis sieben sind anwendungsbezogen [Sch-2019, S. 3ff.].

¹³ ISM-Band ist ein Frequenzbereich, der für den öffentlichen Gebrauch freigegeben ist. Die Nutzung der Frequenzen ist kostenlos [Fin-2015, S. 187].

Wichtige Einflussgrößen von LoRa sind die Coderate, die Bandbreite und der Spreading Factor. Die Coderate beschreibt dabei das Verhältnis zwischen redundanten Codebits und Informationsbits innerhalb einer Nachricht. Eine hohe Coderate schützt die Übertragung vor Interferenzen, erhöht aber gleichzeitig die Übertragungszeit, da die Informationsdichte sinkt. Typische Bandbreiten bei einer LoRa-Anwendung im 863-870 MHz Bereich sind 125 kHz, 250 kHz und 500 kHz. Eine größere Bandbreite bringt eine höhere Datenrate mit sich und verringert dadurch die Übertragungszeit [Bor-2016]. Der Spreading Factor ist ein Parameter der Modulationstechnik, welcher das Verhältnis zwischen Reichweite und Datenrate charakterisiert. Je höher der Spreading Factor, um desto mehr Frequenzen wird das Signal aufgespreizt und zeitlich versetzt gesendet. Durch diese Aufspreizung erhöht sich die Reichweite des Signals, jedoch sinkt gleichzeitig die Datenrate, wodurch die Übertragungszeit bei gleichem Informationsgehalt steigt [Raz-2017, S. 861].

Die maximale Sendezeit eines Geräts, der sogenannte maximale Duty Cycle, wird dabei durch die Bundesnetzagentur beschränkt. Diese regelt frequenzabhängig den maximal erlaubten Duty Cycle für Netzwerke, die in nicht lizenzierten Bändern betrieben werden. Dadurch wird die Blockierung spezieller Frequenzen aufgrund der Dauernutzung eines einzelnen Senders verhindert [Fin-2015, S. 187ff.; Bun-2014]. Der maximale Duty Cycle, also der maximale Prozentsatz bezogen auf die Zeit in der ein Sender einen Kanal belegen darf, ist bspw. bei 868 MHz auf ein Prozent begrenzt. Dies hat zur Folge, dass von jedem Sender eine maximale Übertragungszeit von 36 s pro Stunde eingehalten werden muss [Ade-2017, S. 36]. Je nach Bebauungsgrad können mit LoRa radiale Reichweiten zwischen 2 km im urbanen Raum und 15 km im ländlichen Raum erzielt werden [Ade-2017]. Dabei ist der Payload pro Übertragung auf 255 Bytes, bei einer Datenrate von 0,3 kBit/s bis maximal 50 kBit/s, beschränkt. Der Payload bezeichnet in der Kommunikationstechnik die Nutzdaten eines Datenpakets wie etwa die Sensordaten eines Endgeräts [Aug-2016, S. 6f.; Ade-2017].

Aufbau eines LoRaWAN

LoRaWAN wird analog einer Sterntopologie aufgebaut (siehe Abbildung 2-11). Bei einer sternförmigen Anordnung senden die Endgeräte nur ihren eigenen Payload an das Gateway und empfangen bzw. übertragen keine zusätzlichen Nachrichten von umliegenden Endgeräten. Dies wirkt sich besonders positiv auf den Energieverbrauch aus [Sem-2018, S. 6]. Endgeräte sind beliebige Geräte, bspw. Laptops, Smartphones oder Sensoren, die LoRaWAN für den Datenaustausch nutzen. Endgeräte werden auch als Knoten, Endknoten oder Nodes (bzw. End Nodes) bezeichnet [Bau-2015, S. 22]. Nachrichten eines Endgeräts werden von allen sich in Reichweite befindlichen Gateways empfangen. Ein Gateway ist ein Protokollumsetzer, welcher die Kommunikation zwischen zwei auf unterschiedlichen Protokollen basierenden Netzwerken ermöglicht.

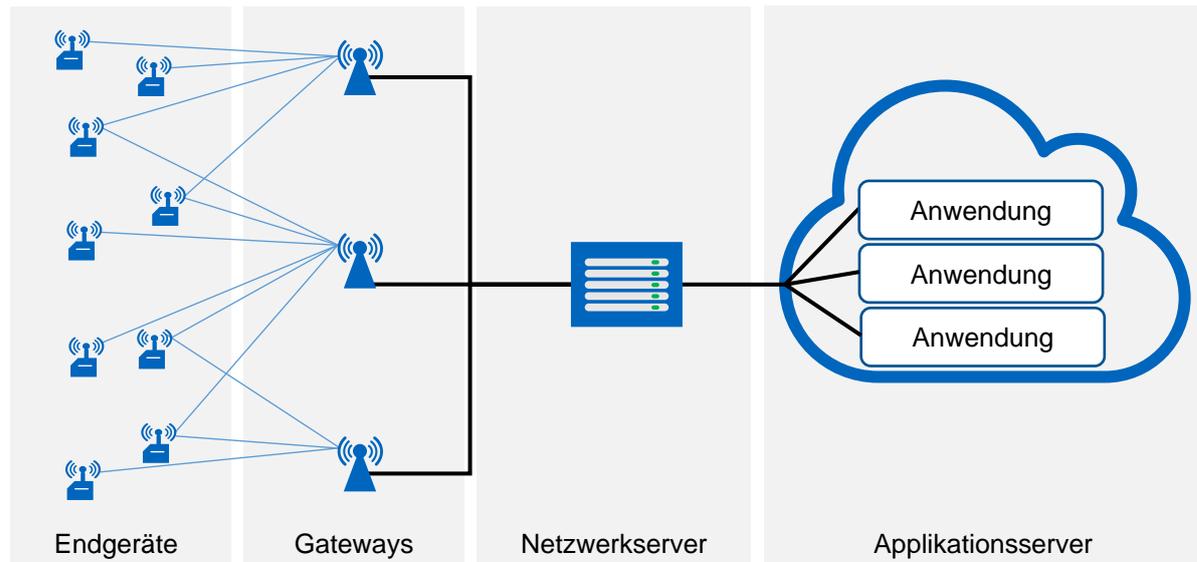


Abbildung 2-11: Vereinfachte Netzwerktopologie von LoRaWAN [in Anlehnung an Sem-2018, S. 6]

Dabei konvertiert das Gateway die Nachrichten entsprechend zwischen den einzelnen Protokollen und fungiert so als Schnittstelle zwischen dem Endgerät und dem Netzwerkserver [Bau-2015, S. 22; Raz-2017, S. 866].

Die Komplexität steckt in der Steuerung und Organisation der Kommunikationsabläufe bzw. des Netzwerks. Diese Aufgaben werden durch den Netzwerkserver verantwortet. Der Netzwerkserver ist mit allen Gateways verbunden und koordiniert die Kommunikation innerhalb des Netzwerks. Er ist die zentrale Verarbeitungseinheit der gesamten Kommunikation innerhalb von LoRaWAN und vereint den Großteil der benötigten logischen Operationen, wodurch eine einfache Gestaltung von Endgeräten und Gateways möglich ist. Ein solcher Netzwerkaufbau ermöglicht es den Endgeräten ihren Payload ohne Abstimmung mit den Gateways auf einem beliebigen Kanal und zu beliebiger Zeit zu verschicken. Das Gateway dient primär der Weiterleitung der Daten zum Netzwerkserver und führt selbst nur geringfügige Operationen aus. Der Netzwerkserver entscheidet wie mit den empfangenen Daten weiter verfahren wird und kommuniziert mit dem Applikationsserver [Raz-2017, S. 866; Sem-2018, S. 5ff.]. Dabei wird zwischen Uplink und Downlink unterschieden. Sogenannte Uplink-Nachrichten sind Datenpakete, die vom Endgerät über ein Gateway zum Netzwerkserver gesendet werden. Als Downlink wird der Datenfluss vom Netzwerkserver zurück zum Endgerät bezeichnet [LoR-2018, S. 12]. Die Datenpakete der Endgeräte haben den Applikationsserver als Ziel. Auf diesem Server laufen Anwendungsprogramme, welche den Payload entschlüsseln, interpretieren und auf dieser Datenbasis grafisch aufbereitete Dienste für den Nutzer bereitstellen. Der Applikationsserver bietet außerdem ein Interface, um Einstellungen am Netzwerk vornehmen zu können [Raz-2017, S. 866; Sem-2018, S. 6ff.].

Zwei weit verbreitete Begrifflichkeiten im Zusammenhang mit LoRaWAN sind JavaScript Object Notation (JSON) und Message Queue Telemetry Transport (MQTT). JSON ist ein kompaktes Datenformat, das für den Austausch und die Speicherung von Daten entwickelt wurde. Die Datenstrukturen werden dabei in Textform mithilfe sogenannter Schlüssel-Wert-Paare (z. B. "Temperatur" : 36) beschrieben, wodurch die Daten durch den Menschen leicht zu interpretieren sind. JSON-Objekte bestehen im Regelfall aus mehreren solcher Schlüssel-Wert-Paare, die ineinander verschachtelt die Daten strukturiert abbilden [Ple-2017, S. 42ff.]. Dieses Datenformat wird bei LoRaWAN sowohl für die Uplink- als auch für die Downlink-Nachrichten verwendet. Zur Übertragung der JSON-Objekte wird neben proprietären Nachrichtenprotokollen auch MQTT verwendet [Sem-2015b; Spi-2017].

MQTT ist ein einfaches und zugleich schnelles, standardisiertes Protokoll, welches vermehrt im IoT-Umfeld seinen Einsatz findet und auf dem publish/subscribe-Mechanismus beruht [Alq-2018; Mis-2020]. Dieser Mechanismus erlaubt es Clients (z. B. Sensoren oder Anwendungen) zu bestimmten Themen (topics) Informationen zu veröffentlichen (publish) und bestimmte Themen zu abonnieren (subscribe). Clients können sowohl mehrere Themen abonnieren als auch zu mehreren Themen veröffentlichen. Dabei werden alle Nachrichten durch den sogenannten MQTT-Broker verwaltet, der die veröffentlichten Informationen an die zugehörigen Themenabonnenten weiterleitet. Innerhalb des MQTT Standards sind drei Qualitätslevel (eng. Quality of Service, QoS) für die Datenübertragung definiert. Bei QoS 0 wird höchstens ein Zustellungsversuch unternommen, wobei nicht garantiert wird, dass dieser erfolgreich ist. QoS 1 bedeutet, dass die Nachricht mindestens einmal ankommt. Es können allerdings Duplikate auftreten. Wird QoS 2 umgesetzt, kommen die Nachrichten genau einmal beim Empfänger an [OAS-2019].

Geräteklassen in einem LoRaWAN

Bei LoRaWAN gibt es die drei Endgeräteklassen A, B und C (siehe Abbildung 2-12). Endgeräte der Klasse A sind batteriebetrieben und übertragen ihre Uplink-Nachricht zu einem zufälligen Zeitpunkt. Selbst wenn diese Geräte eine intervallbasierte Übertragung des Payloads unterstützen, ist kein exakter Zeitplan hinterlegt. Jedes Mal, wenn ein Klasse A Endgerät einen Uplink schickt, erwartet es einen Downlink. Dafür öffnet das Endgerät zwei aufeinander folgende Empfangszeitfenster. Kommt im ersten Zeitfenster die Rückantwort vom Netzwerkserver, geht das Endgerät wieder in den Ruhezustand über. Anderenfalls wartet das Endgerät auch das zweite Zeitfenster ab und geht anschließend, unabhängig vom erfolgreichen Empfang eines Downlinks, in den Ruhezustand über, um Strom zu sparen. Sobald sich ein Endgerät im Ruhemodus befindet, gibt es keine Möglichkeit dieses vom Netzwerkserver aus aufzuwecken. Endgeräte der Klasse A sind eine gute Wahl für Sensoren, die in regelmäßigen Abständen

ihre Werte übermitteln. Sie arbeiten besonders energieeffizient und können lange Batterielaufzeiten erzielen. Klasse A Endgeräte können allerdings aufgrund der unregelmäßigen Downlink-Zeitfenster nicht sinnvoll für Aktorik eingesetzt werden [Sem-2018, S. 8ff.].

Klasse B Endgeräte versuchen diesen Nachteil mit einem fest definierten Rhythmus für Downlink-Zeitfenster auszugleichen. Auch diese Endgeräte sind batteriebetrieben, haben aber sich periodisch wiederholende, fest definierte Zeitfenster, in denen sie auf einen Downlink vom Netzwerkserver warten. Diese Zeitfenster sind zwischen Gateway und Endgerät synchronisiert. Uplink-Nachrichten können nur außerhalb dieser Zeitfenster gesendet werden. Beispiele für Klasse B Endgeräte sind Schlösser oder Bewässerungsanlagen, die einen garantierten, periodischen Zugang vom Netzwerkserver aus benötigen [Sem-2018, S. 8ff.].

Ans Stromnetz angeschlossene Endgeräte werden in Klasse C eingeordnet. Diese sind immer aktiv und warten, sofern sie keinen Uplink schicken, auf eine Downlink-Nachricht vom Netzwerkserver. Das Besondere hierbei ist, dass das Empfangszeitfenster für Downlinks erst geschlossen wird, wenn eine Uplink-Nachricht gesendet werden muss. Nach dem erfolgreichen Sendevorgang wird das Empfangszeitfenster direkt wieder geöffnet. Geräte der Klasse C werden u. a. in Steuerungseinheiten von Straßenbeleuchtungen oder Stromzählern eingesetzt [Sem-2018, S. 8ff.].

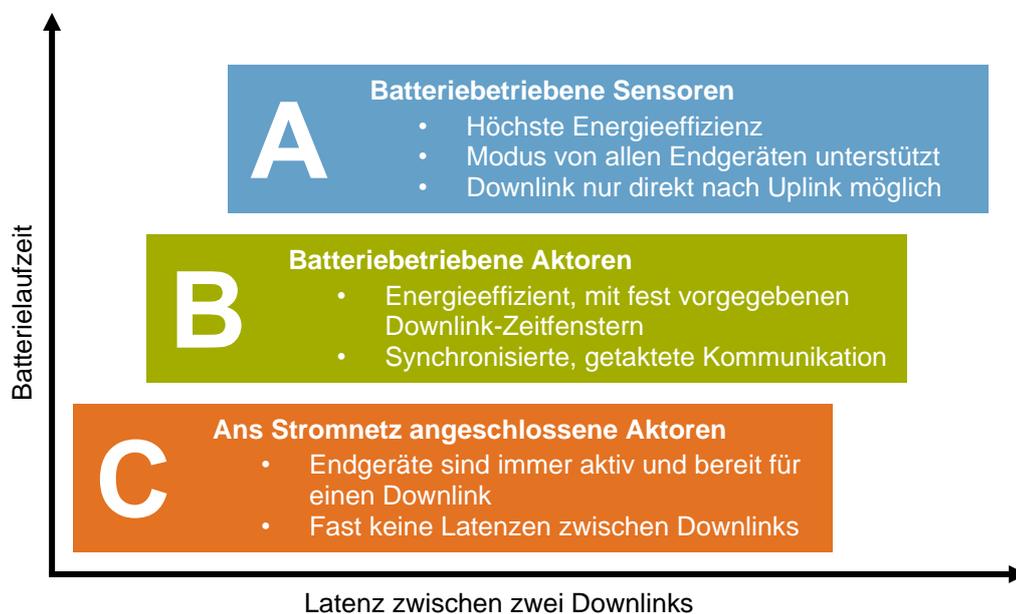


Abbildung 2-12: Klassen an Endgeräten bei LoRaWAN [in Anlehnung an Sem-2018, S. 10]

Weitere wichtige Größen in Zusammenhang mit LoRaWAN sind der Signal-to-noise-ratio, die Received Signal Strength und der Received Signal Strength Indicator, welche im Folgenden erläutert werden.

Signal-to-noise-ratio (SNR), also das Signal-Rausch-Verhältnis, ist definiert als das Verhältnis zwischen Signalleistung P_{Signal} und Störleistung $P_{Rauschen}$ einer empfangenen Übertragung und wird in dB angegeben:

$$SNR = 10 \times \log_{10} \left(\frac{P_{Signal}}{P_{Rauschen}} \right) \text{ dB} . \quad (2-1)$$

Je höher der SNR-Wert, desto besser ist das Signal vom Grundrauschen zu unterscheiden und entsprechend zu empfangen [Hei-2020, S. 3]. Durch die Erhöhung des Spreading Factors steigt die SNR und dadurch die Reichweite des Signals [Bor-2016].

Bei einem LoRaWA-Netzwerk wird eine Nachricht erfolgreich empfangen, wenn die Received Signal Strength (RSS, die Leistung des empfangenen Signals) P_{rx} über der Empfangssensitivität S_{rx} des Gateways liegt. Dabei hängt P_{rx} (in dBm) von der Sendestärke P_{tx} des Endgerätes, vom Signalgewinn bzw. -verlust (GL) entlang des Sendewegs und vom Pfadverlust (L_{pl}) ab:

$$P_{rx} = P_{tx} + GL - L_{pl} . \quad (2-2)$$

Signalgewinne oder -verluste können u. a. durch die Antennenverstärkung oder durch Verluste beim Sender/Empfänger auftreten und werden in GL zusammengefasst [Bor-2016]. Zur Bestimmung des Pfadverlusts gibt es in der Literatur viele Modelle, welche entsprechend der Umgebungsbedingungen (bebautes Gebiet, freier Raum) ausgewählt werden müssen (vgl. [Bor-2016]).

Die Empfangssensitivität S_{rx} in dBm kann mit

$$S_{rx} = -174 + 10 \log_{10}(BW) + NF + SNR \quad (2-3)$$

berechnet werden. Dabei ist die Sensitivität von der eingesetzten Bandbreite (BW , in Hz), der Rauschzahl des Empfängers (NF , konstant für eine definierte Hardwareimplementierung) und von der SNR abhängig [Bor-2016; Sem-2015a, S. 13]. Bei gängigen Hardwareimplementierungen von LoRaWAN liegt die maximal erzielbare Empfangssensitivität üblicherweise zwischen $S_{rx} = -118 \text{ dBm}$ und $S_{rx} = -137 \text{ dBm}$ [Sem-2015a, S. 22].

Der Received Signal Strength Indicator (RSSI) ist ein Indikator für die Leistung, mit der das Signal empfangen wird. Dabei handelt es sich um ein relatives Maß für den RSS Wert, welches je nach Chiphersteller unterschiedlich definiert wird. Dieses kann bspw. bei einem WiFi-Chipsatz zwischen 0 und 60 (Atheros) oder zwischen 0 und 100 (Cisco)

liegen [Zaf-2019, S. 2571]. Im Vergleich dazu entspricht der RSSI Wert innerhalb eines LoRaWAN der gemessenen Signalleistung der empfangenen Nachricht am Gateway (dem RSS-Wert) und wird in dBm angegeben [Bor-2016].

3 Stand der Wissenschaft und Technik

Aufbauend auf den vorgestellten Grundlagen in Kapitel 2 wird im Folgenden der aktuelle Stand der Wissenschaft und Technik bzgl. relevanter Teillösungen und Konzepte im Zusammenhang mit Architekturen für unternehmensübergreifende Service-Systeme, welche auf intelligenten, modularen Sonderladungsträgern basieren, präsentiert. Dabei liegt der Fokus, wie in Abschnitt 1.1 beschrieben, auf der Automobilindustrie. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden die Begriffe „Dienst“ und „Service“ synonym verwendet.

3.1 Themenbereiche und Bewertungskriterien der Literaturrecherche

Für die strukturierte Literaturanalyse bzgl. existierender Forschungsarbeiten im Hinblick auf die Zielsetzung dieser Arbeit (siehe Abschnitt 1.2) werden drei Themenbereiche genauer betrachtet: Ansätze für modulare Sonderladungsträger, Referenzarchitekturen für das IoT und intelligente Behälter in der Logistik. Um den in der Literatur bereits adressierten Umfang in Bezug auf die eingangs formulierte Zielstellung zu erfassen, werden alle innerhalb der drei Themenbereiche recherchierten Forschungsarbeiten anhand von sechs Kriterien qualitativ bewertet. Die sechs Bewertungskriterien leiten sich aus der Zielsetzung ab und lauten wie folgt:

- *Modulare Sonderladungsträger*: Gestaltung, Einsatz und Services im Zusammenhang mit modularen Sonderladungsträgern.
- *IoT-Technologien am Ladungsträger*: Einsatz von Identifikations-, Kommunikationstechnologie und Sensorik am Ladungsträger.
- *Durchgängige Erfassung von Daten*: unternehmensübergreifende Datenerfassung (u. a. mithilfe von IoT-Technologien) sowohl innerhalb des Behälterkreislaufs als auch entlang des gesamten Lebenszyklus des Ladungsträgers von dessen Entwicklung bis zur Entsorgung.
- *Einführung von Services*: Einsatz datenbasierter und datenunterstützter, physischer Services aufbauend auf den entlang des Lebenszyklus erfassten Daten.
- *Unternehmensübergreifendes Service-System*: unternehmensübergreifende Verfügbarkeit von Services und Daten, Zusammenwirken von Akteuren und Ressourcen zur Erbringung der Dienste.
- *Architekturkonzept für Service-Systeme*: Architekturkonzept zur Regelung von unternehmensübergreifenden Services, Ressourcen, Datenflüssen, Berechtigungen, Rollen und Schnittstellen.

Zur Erfassung des aktuellen Stands der Wissenschaft und Technik werden im Folgenden die innerhalb der drei Themenbereiche existierende Forschungsarbeiten genauer betrachtet. Dabei ist es das Ziel der Ausführungen, den verbleibenden Forschungsbedarf in Bezug auf die sechs Bewertungskriterien zu ermitteln.

3.2 Ansätze für modulare Sonderladungsträger

Hybride Konzepte für Sonderladungsträger, sogenannte modulare Sonderladungsträger, existieren bereits seit einigen Jahren. Diese Konzepte zielen darauf ab, die Demontage des Sonderladungsträgers am Ende des Nutzungszyklus sowie die Rekonfiguration und Wiederverwendung einzelner Module für einen weiteren Zyklus zu ermöglichen [Kam-2011].

Innerhalb des Projekts *ReBox-Pool* (Logistikeffizienz durch rekonfigurierbare Sonderladungsträger) der RWTH Aachen wurde eine modulare Struktur für einen Sonderladungsträger entwickelt. Diese besteht aus vier wiederverwendbaren Modulen: dem Grundträger, dem Innenleben, dem Informationsmodul (bspw. für Begleitscheine) und den Seitenstützen (siehe Abbildung 3-1). Der Grundrahmen wird dabei aus verschiedenen Standardrastern der Größe 600 mm x 400 mm zusammengesetzt, welche mit Seitenstützen in unterschiedlichen Längen kombiniert werden. Die Seitenstützen ermöglichen das Anbringen von diversen Innenleben über Lochleisten. Neben dem physischen Sonderladungsträger wurde ein Lebenszyklusmodell erstellt, welches den Lebenszyklus von Transportgut und Ladungsträger trennt. Darauf aufbauend wurde ein Pooling-System für modulare Sonderladungsträger entwickelt, bei dem der Pooling Betreiber technische Services (bspw. die Wartung) und organisatorische Services (bspw. der Transport der Ladungsträger) zur Verfügung stellt. Die entwickelte Lösung

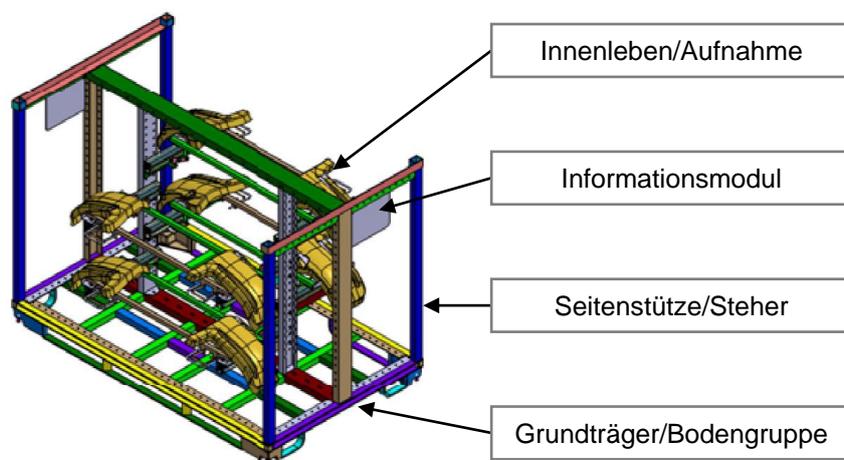


Abbildung 3-1: Aufbau des modularen Sonderladungsträgers im Projekt *ReBox-Pool* [in Anlehnung an Kam-2011, S. 6]

strebt dabei u. a. die Vereinfachung der Prozessabläufe, eine flexiblere Bereitstellung von Sonderladungsträgern, die Wiederverwendung von Ladungsträgermodulen und die Wirtschaftlichkeit des Pooling-Systems an [Kam-2011; Sch-2012]. *Attig*, einer der Bearbeiter von ReBox-Pool, erweiterte die Projektergebnisse in seiner Dissertation und entwickelte ein Konzept zur Gestaltung und Bewertung modularer Sonderladungsträger. Hier wird einerseits der Fokus auf die wirtschaftliche Konstruktion und Produktion der Behälter als auch auf das Geschäftsmodell des Pooling-Systems gerichtet [Att-2011].

Ein weiteres Projekt, *LoEMoS* (Logistikeffizienz durch modulare Sonderladungsträger), der RWTH Aachen fokussierte die Erstellung eines neuen Geschäftsmodells für den Pooling-Betrieb der modularen Sonderladungsträger. Dabei wurden über die Ergebnisse von ReBox-Pool hinausgehend das Nutzenversprechen, die Architektur der Leistungserstellung und das Ertragsmodell erarbeitet. Physische Services wie Instandsetzung, Lagerung, Transport und Konfiguration/Umbau waren Teil des konzipierten Nutzenversprechens. Außerdem wurde die RFID-Technologie für das Management des Pools angedacht, um Daten über Instandhaltungsmaßnahmen, Einsatzzwecke und Konfiguration der sich im Umlauf befindlichen modularen Sonderladungsträger abfragen und nachverfolgen zu können [Kam-2012; Bur-2011].

Rosenthal entwickelte im Rahmen ihrer Dissertation ein ganzheitliches Bewertungsmodell, welches alle Kosten und Erlöse, die während des Lebenszyklus eines modularen Ladungsträgers anfallen, berücksichtigt. Dabei beschreibt die Autorin einen ersten Ansatz zur Reduktion der Komplexität und Variantenvielfalt von Sonderladungsträgern durch die Einführung eines Baukastensystems. Basierend auf diesem können die Lebenszykluskosten ermittelt werden. Das aufgestellte Bewertungsmodell soll bereits in einer frühen Phase der Entwicklung von Ladungsträgerkonzepten eine transparente Bewertung von Alternativen anhand der Lebenszykluskosten ermöglichen. Auch kann abgeschätzt werden, ob sich die Einführung eines modularen Ladungsträgerkonzepts im direkten Vergleich zu einem herkömmlichen Sonderladungsträger lohnt, bzw. wie hoch die damit verbundenen Mehrkosten sind. Darüber hinaus werden die konkreten Potenziale von Modularisierung und die damit verbundene Reduzierung der Komplexität aufgezeigt [Ros-2016].

Auch in der Industrie lassen sich bereits einige Entwicklungsprojekte von proprietären Baukastensystemen für modulare Sonderladungsträger finden. Ein Beispiel hierfür ist der modulare Sonderladungsträger von *MAN Truck & Bus*. Bei dessen Entwicklung wurde das Ziel verfolgt, die Vorteile von Universalladungsträgern und Sonderladungsträgern zu verbinden, um u. a. die Stapelbarkeit untereinander zu gewährleisten. Die

modularen Strukturen sollen darüber hinaus die einfache Instandsetzung und Wiederverwendbarkeit von Einzelmodulen über mehrere Lebenszyklen und eine Verkürzung der Entwicklungs- und Beschaffungszeit ermöglichen. Der entwickelte modulare Sonderladungsträger ist dafür in die Module Bodengruppe, Steher, Verkleidung und Innenleben aufgeteilt. Die einzelnen Module können mit Schrauben verbunden werden. So soll eine Vielzahl von Kombinationen bei überschaubarer Komponentenanzahl realisiert werden [Mei-2015; Hub-2013].

Bei den vorgestellten Arbeiten liegt der inhaltliche Fokus auf modularen Sonderladungsträgern. Dabei wurde vor allem die bauliche Ausgestaltung des modularen Systems für Sonderladungsträger untersucht (vergleiche Tabelle 3-1). Physische Services (z. B. Wartung) im Zusammenhang mit einem Behälterpooling von modularen Sonderladungsträgern wurden nur in einem geringen und eher generischen Ausmaß erforscht. Ein erstes Konzept betrachtete die Einführung von Identifikationstechnologien (RFID) für das Management des Behälterpools (vgl. [Kam-2012]). Die Nutzung von weiterführenden Technologien (z. B. Sensoren) und die Betrachtung einer unternehmensübergreifenden, durchgängigen Datenerfassung waren nicht Bestandteil der vorgestellten Forschungen zu modularen Sonderladungsträgern. So verbleiben die Potenziale einer Kombination von modularen Strukturen und datenbasierten Diensten, z. B. beim Reparaturprozess selbst oder bei der Kombination von Reparatur und datenbasierter Zustandsüberwachung, unerforscht. Auch fehlen Betrachtungen zu unternehmensübergreifenden Service-Systemen und Architekturen zur Realisierung von datenbasierten und datenunterstützten physischen Diensten entlang des Lebenszyklus eines modularen Sonderladungsträgers.

Tabelle 3-1: Qualitative Bewertung der präsentierten Forschungsarbeiten des Themenbereichs „modulare Sonderladungsträger“ hinsichtlich der eingeführten Kriterien

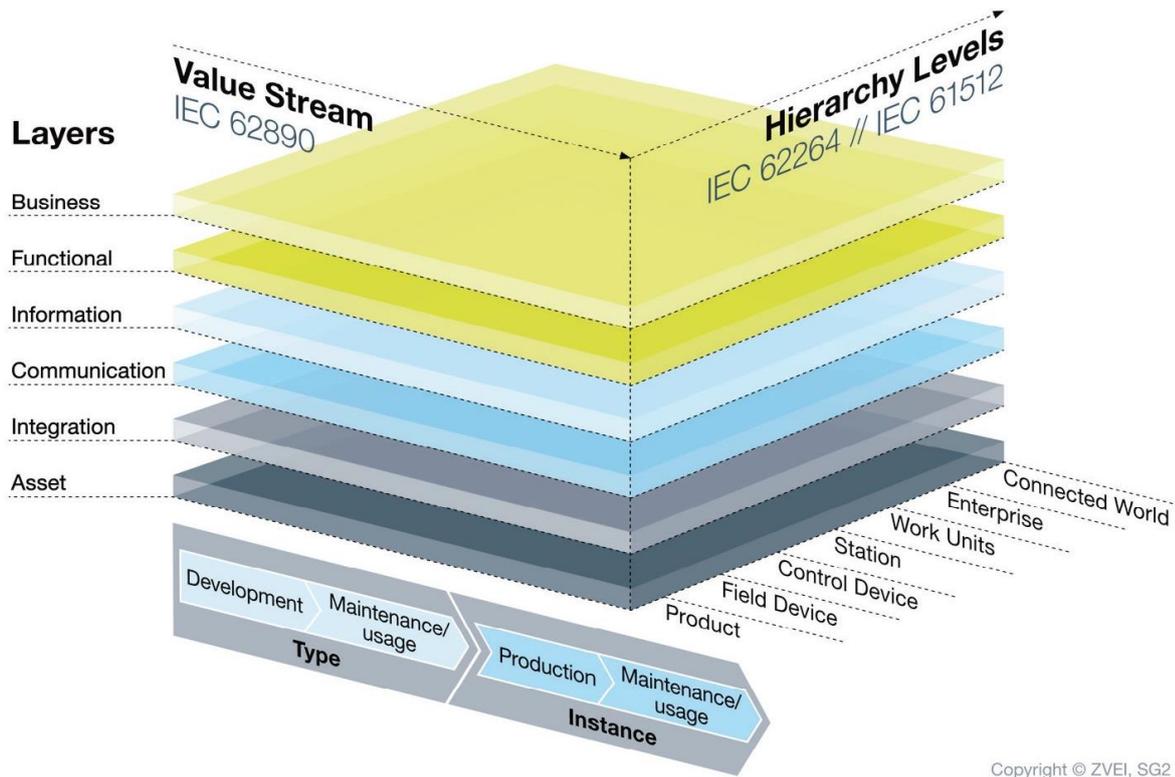
Publikation	Modulare Sonderladungsträger	IoT-Technologien am Ladungsträger	Durchgängige Erfassung von Daten	Einführung von Services	Unternehmensübergreifendes Service System	Architekturkonzept für Service-Systeme
[Kam-2011] [Sch-2012]	●	○	○	●	●	○
[Att-2011]	●	○	○	●	●	○
[Kam-2012] [Bur-2011]	●	●	●	●	●	○
[Ros-2016]	●	○	○	○	○	○
[Mei-2015] [Hub-2013]	●	○	○	○	○	○

- umfangreich behandelt
- viele Aspekte berücksichtigt
- einige Aspekte enthalten
- nur wenige Aspekte adressiert
- nicht Inhalt der Publikation

3.3 Referenzarchitekturen für das IoT

Softwarelösungen, die ein unternehmensübergreifendes Behältermanagement ermöglichen, sind bereits auf dem Markt verfügbar (z. B. [Eur-2016; Wus-2015]). Diese Softwarelösungen zielen allerdings auf die Analyse von Daten aus Enterprise Resource Planning-Systemen (ERP-Systemen) ab und verarbeiten keine auf der Shopfloor-Ebene erfassten Daten von intelligenten Behältern. Um die Integration von Geräten des IoT zu ermöglichen, werden, analog zu IT-Architekturen, passende IoT-Architekturen benötigt, die alle relevanten Aspekte für eine erfolgreiche Umsetzung zusammenführen und entsprechend eine Referenzarchitektur für zukünftige Systeme darstellen [Ado-2015, S. 5]. Die drei am weitesten verbreiteten Referenzarchitekturen in diesem Zusammenhang sind das Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0, die Industrial Internet of Things Reference Architecture und die Internet of Things-Architecture [Wey-2016]. Diese werden im Folgenden vorgestellt.

Das Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0), dargestellt in Abbildung 3-2, ist eine Referenzarchitektur für Smart Factories und CPS, die ihren Ursprung in Deutschland hat. RAMI4.0 nutzt Ansätze aus der SOA und zielt darauf ab ein einheitliches Verständnis für alle Akteure in einem Industrie 4.0-Ökosystem zu schaffen. Dabei gliedert sich RAMI4.0 in drei Dimensionen auf: *Layers*, *Life Cycle & Value Stream* und *Hierarchy Levels*. Die Achse *Layers*, eine funktionale Sichtweise, teilt das IoT-Ökosystem in die Schichten *Asset*, *Integration*, *Communication*, *Information*, *Functional* und *Business* auf. Nur die unterste Schicht, der *Asset Layer*, repräsentiert die reale physische Welt. Der *Integration Layer* bildet die Schnittstelle zwischen der physischen und der virtuellen Welt. Der darauf aufbauende *Communication Layer* ermöglicht eine vereinheitlichte Kommunikation und einen Austausch von Daten, wobei die Daten im *Information Layer* abgelegt werden und so für Funktionen und Services des *Functional Layers* bereitstehen. Durch den *Business Layer* werden neben organisatorischen und rechtlichen Rahmenbedingungen die Geschäftsprozesse festgelegt. Diese funktionale Sichtweise der *Layers* wird durch die Achse *Life Cycle & Value Stream* und somit um den Lebenszyklus eines Assets nach IEC 62890 und die damit verbundene Wertschöpfungskette erweitert. Dabei werden die Phasen Typ (z. B. Behältertyp) und Instanz (z. B. Behälter mit der Nummer 208176) in den verschiedenen Abschnitten des Lebenszyklus unterschieden. Die dritte Dimension konzentriert sich auf die Hierarchieebenen eines Unternehmens und umfasst die Stufen: *Product*, *Field Device*, *Control Device*, *Station*, *Work Units*, *Enterprise* und *Connected World*. So wird eine funktionale Zuweisung der Assets zu den Hierarchieebenen eines Unternehmens nach IEC 62264 und IEC 61512 ermöglicht [Ado-2015].



Copyright © ZVEI, SG2

Abbildung 3-2: Aufbau von RAMI4.0 [Ado-2015, S. 7]

Sharpe et al. merken an, dass bei RAMI4.0 Sicherheitsaspekte von CPS und deren Wechselwirkungen mit Menschen innerhalb der Lieferkette nicht berücksichtigt werden. Anhand von drei realen Szenarien innerhalb eines Industriebetriebs wurden Erweiterungen von RAMI4.0 bzgl. der Sicherheitsaspekte und der Integration des Menschen von *Sharpe et al.* erarbeitet. Die vorgeschlagenen Sicherheitserweiterungen betreffen dabei die Übertragungs- (transmission), Daten- (data) und physikalischen (physical) Funktionalitäten. Die Übertragungssicherheit beschäftigt sich mit der sicheren Übertragung von Anmelde- und Anfragedaten zwischen den einzelnen *Layers* von RAMI4.0. Sie stellt sicher, dass der Benutzer authentifiziert und autorisiert ist und, dass Daten verschlüsselt werden. Die physikalische Sicherheit konzentriert sich auf die physischen Objekte (*Asset Layer*), welche Daten übertragen sowie sicher und zuverlässig arbeiten müssen. Hierbei muss die Gefahr von Manipulationen ausgeschlossen werden. Die korrekte Eingabe von Daten in das System bzw. deren Eingabevalidierung und Sicherstellung der Authentizität der Datenquelle werden dem Bereich der Datensicherheit zugeordnet. Die vorgeschlagenen Sicherheitsaspekte können innerhalb von RAMI4.0 mithilfe einer speziellen Notation dargestellt werden [Sha-2019].

Für die Integration des Menschen in RAMI4.0 wurden von *Sharpe et al.* anhand der International Standard Classification of Occupations (vgl. [Int-2012b]) die folgenden sechs für Industrie 4.0 relevanten Personengruppen identifiziert und entsprechend

dem Modell umbenannt: Manager, Ingenieure, Techniker, Sachbearbeiter, Bediener, Maschinisten und Arbeiter. Die *Life Cycle*-Achse wird dabei durch eine Personengruppenachse ersetzt, um RAMI4.0 bzgl. des Faktors Mensch zu erweitern. Dabei ist laut *Sharpe et al.* fallabhängig zu entscheiden, ob die Personengruppenachse oder die *Life Cycle*-Achse zum Einsatz kommt. Durch diese vorgeschlagenen Erweiterungen von RAMI4.0 soll die forschungsorientierte Architektur zu einer industriell relevanteren, praxisorientierten Referenzarchitektur weiterentwickelt werden [Sha-2019].

Die Industrial Internet of Things Reference Architecture (IIRA) bietet ebenfalls einen Rahmen für den Architektorentwurf zur Integration von CPS in die Produktionsumgebung. Dabei hat die IIRA in erster Linie eine softwareorientierte Sichtweise. IIRA spaltet sich in vier Viewpoints auf (*Business, Usage, Functional* und *Implementation*). Der *Business Viewpoint* bezieht sich auf die Identifikation von Stakeholdern und deren Geschäftsvisionen, Werte und Ziele. Der *Usage Viewpoint* beschreibt die benötigten Aktivitäten von Menschen und Systemen, um die erwünschten Funktionen zu erfüllen. Darauf aufbauend strukturiert der *Functional Viewpoint* die Funktionskomponenten und erfasst deren Beziehungen und Schnittstellen untereinander und zur Außenwelt. Der *Implementation Viewpoint* fokussiert die technische Realisierung des Systems. Der Schwerpunkt dieses Aufbaus liegt im *Functional Viewpoint*, welcher sich in *Crosscutting Functions* (z. B. Konnektivität und Datenmanagement), *System Characteristics* sowie *Functional Domains* weiter untergliedert (siehe Abbildung 3-3). Alle drei Bereiche beschreiben Anforderungen, die bei der Entwicklung von Systemen zu beachten sind. Dabei fordern die *System Characteristics* die Etablierung eines vertrauenswürdigen Systems, indem Safety¹⁴, Security¹⁵, Resilienz, Zuverlässigkeit, Datenschutz und Skalierbarkeit gewährleistet werden. So soll eine hohe Daten- und Prozesssicherheit garantiert werden. Obwohl die *Functional Domains* des *Functional Viewpoints* den *Layers* von RAMI4.0 stark ähneln und die Phasen des Lebenszyklus eines IoT-Systems berücksichtigt werden, fehlen der IIRA die Dimensionen *Value Stream* und *Hierarchy Levels*. Der Vorteil der IIRA liegt darin, dass die Gestaltung der Viewpoints mit anderen Software-Referenzmodellen weitgehend konsistent sind [Ind-2019].

¹⁴ Safety: Schädwirkungen vermeiden, die vom System selbst ausgehen, eng verknüpft mit der Zuverlässigkeit des Systems [Krc-2015, S. 523f.].

¹⁵ Security: Prävention von potenziellen Schadeinwirkungen auf das System von außen [Krc-2015, S. 523f.].

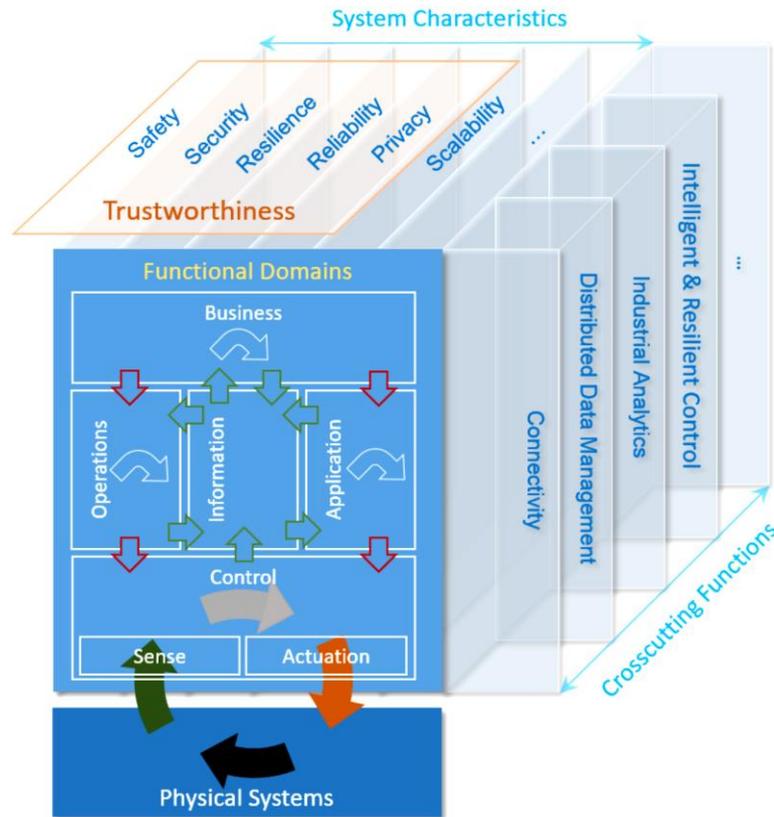


Abbildung 3-3: Functional Viewpoint der IIRA [Ind-2019, S. 35]

Die Internet of Things-Architektur (IoT-A) unterscheidet zwischen einem Referenzmodell und einer Referenzarchitektur. Das Referenzmodell (bestehend aus *Domain Model*, *Information Model*, *Functional Model*, *Communication Model* und *Trust, Security and Privacy*) soll beim Aufbau eines gemeinsamen Verständnisses des IoT-Systems und dessen Anforderungen helfen. Dabei beschreibt das *Domain Model* die Kernelemente wie Devices (dt.: Geräte), Services und deren Beziehungen. Darauf aufbauend strukturiert das *Information Model* die im System anfallenden Informationen und Daten der Kernelemente. Durch das *Functional Model* werden die Prozesse und Interaktionen der einzelnen Elemente definiert, wobei deren Kommunikation untereinander und mit der Außenwelt durch das *Communication Model* adressiert wird. Der Bereich zu *Trust, Security and Privacy* nimmt sich modellübergreifend der Themen Vertrauen, Sicherheit und Privatsphäre an. Die zur konkreten Realisierung des IoT-Systems benötigten Bausteine sowie Design-Entscheidungen in Bezug auf Anforderungen, Funktionalitäten, Einsatz und Sicherheit werden durch die Referenzarchitektur beschrieben. Dabei verfolgt die Referenzarchitektur einen ähnlichen Ansatz wie IIRA und teilt sich in drei Views auf: *Functional View* (Funktionskomponenten, Verantwortungsbereiche und Schnittstellen), *Information View* (Austausch, Speicherung und Verwaltung von Informationen) und *Deployment & Operation View* (Hilfestellungen für

die Auswahl von Technologien und die Umsetzung des Systems). Durch diese Aufteilung können die Aspekte der Architektur besser strukturiert und die Anforderungen von unterschiedlichen Interessensgruppen genauer adressiert werden. Die vier sogenannten *Architectural Perspectives* (*Evolution and Interoperability*, *Availability and Resilience*, *Trust, Security and Privacy* und *Performance and Scalability*) sollen darüber hinaus sicherstellen, dass das IoT-System View-übergreifend Qualitätseigenschaften und -richtlinien erfüllt [Bau-2013].

Weitere bekannte Referenzarchitekturen für das IoT sind:

- Industrial Value Chain Reference Architecture (IVRA) (vgl. [Nis-2018])
- Referenzarchitektur des International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sectors (ITU-T) (vgl. [Int-2012a])
- Projekt IC4F (vgl. [Ind-2018])
- Industrial Data Space (IDS) (vgl. [Ott-2017])
- Intelligent Manufacturing System Architecture (IMSA) (vgl. [Gay-2018]).

Diese Architekturen geben, ähnlich wie RAMI4.0, IIRA und IoT-A, nur einen generischen Überblick über das Themenfeld, sind aber nicht so stark verbreitet. Zwei weitere Referenzarchitekturen, die verstärkt auf das Behältermanagement eingehen, werden im Folgenden genauer beschrieben.

Iacob et al. entwickelten eine Architektur für Situation-aware Smart Logistics, die sogenannte Situation-aware Smart Logistics Enterprise Architecture (SSLEA). Ziel dieser Architektur ist es, Störungen innerhalb der Lieferkette anhand der durch IoT-Devices¹⁶ bereitgestellten Daten automatisch zu erkennen. Bei der Entwicklung stand die Überwachung der Einhaltung der Lebensmittelkühlkette bei LKW-Trailern im Vordergrund. Aufbauend auf einer Literaturanalyse wurden für die SSLEA drei Viewpoints konzipiert: *Layerd Viewpoint*, *Business Process Viewpoint* und *Data Structure Viewpoint*. Der *Layerd Viewpoint* besteht dabei aus dem *Business Layer*, dem *Application Layer* und dem *Infrastructure Layer*. Der *Business Layer* beinhaltet die Funktionen und Geschäftsprozesse, welche zur grundlegenden Ausgestaltung von Situation-aware Smart Logistics benötigt werden (z. B. Wissensmanagement). Der *Application Layer* ermöglicht die Durchführung der gewünschten Geschäftsprozesse, indem er den Zugang zu Daten und diversen Funktionalitäten (z. B. Visualisierung oder Verarbeitung von Informationen) gewährleistet. Durch den *Infrastructure Layer* werden die benötigten physischen oder virtualisierten Ressourcen (z. B. Datenbanken oder Rechenkapazitäten) für die

¹⁶ Ein IoT-Device ist ein Endgerät, welches diverse Kommunikations-, Identifikationstechnologien und Sensoren vereint.

geplanten Funktionalitäten bereitgestellt. Der *Business Process Viewpoint* hingegen fokussiert die Geschäftsprozesse, welche durch die neu gewonnenen Daten beeinflusst werden oder diese nutzen können. Innerhalb des Viewpoints werden fallspezifische Services für die SSLEA konzipiert (z. B. Warnung bei einer Temperaturüberschreitung). Darauf aufbauend wird der *Data Structure Viewpoint* dazu genutzt die detaillierte Datenarchitektur der entwickelten Lösung zu beschreiben. Ein erster Prototyp der Architektur wurde für die Überwachung einer Kühlkette implementiert. Dabei ermöglichte die erstellte Architektur die Visualisierung von Grenzwertabweichungen in Bezug auf die Temperatur innerhalb von LKW-Trailern (gemessen über intelligente Mehrwegpaletten). Die Funktionalität des erstellten Prototyps konnte abschließend nur anhand einer Simulationsstudie validiert werden [Iac-2019].

Verdouw et al. konzipierten eine IoT-Referenzarchitektur für die Agrar- und Ernährungswirtschaft. Dabei wurden, auf der Grundlage einer umfangreichen Literaturanalyse, die Sichtweisen mehrerer generischer Software- und IoT-Referenzarchitekturen kombiniert, um die Modellierung von IoT-basierten Systemen zu vereinfachen. Basierend auf dieser Analyse wurde ein Leitfaden mit sechs Viewpoints definiert: *Domain Model Viewpoint*, *Business Process Hierarchy Viewpoint*, *IoT Layer Viewpoint*, *Deployment Viewpoint*, *Information Model Viewpoint* und *Interoperability Endpoints Viewpoint*. Der *Domain Viewpoint* fasst dabei die wichtigsten funktionalen Aspekte eines IoT-basierten Systems in Bezug auf die Akteure, die physischen Entitäten, die IoT-Komponenten und deren Interaktionen zusammen. Der *Business Process Hierarchy Viewpoint* gibt einen Überblick über die Geschäftsprozesse (inkl. des Wertschöpfungsprozesses). Mithilfe des *IoT Layer Viewpoint* werden die einzelnen Komponenten aus einer rein technischen Sichtweise heraus betrachtet, um geeignete Anbieter für die Infrastruktur und technische Umsetzung zu identifizieren. Innerhalb des *Deployment Viewpoint* werden die Hardware- und Software-Komponenten strukturiert und als detaillierte technische Architektur dargestellt. Der *Information Model Viewpoint* fokussiert die Modellierung der anfallenden Daten innerhalb des IoT-Systems. Die Hauptschnittstellen für die Kommunikation mit weiteren Systemen werden über den *Interoperability Endpoints Viewpoint* definiert. Der so entstandene Leitfaden zur Anwendung der Viewpoints wurde innerhalb des europäischen Projekts IoF2020 auf 19 Anwendungsfälle in der Agrar- und Ernährungswirtschaft angewandt und validiert [Ver-2019].

Einer der relevantesten Anwendungsfälle des Projekts IoF2020 für diese Arbeit ist die „Intelligent Fruit Logistics“. In diesem Fallbeispiel wurden in einige Obststeigen von Euro Pool System IoT-Devices, bestehend aus einem LPWAN Modul, einem Global Positioning System-Chip (GPS-Chip) und einem Quick Response-Code (QR-Code), integriert. So konnten die Positionsdaten der Behälter entlang der Obst-Supply Chain

erfasst und an das implementierte Back-End übertragen werden. Die mithilfe des Leitfadens entwickelte Architektur (Domain Model Viewpoint in Abbildung 3-4 dargestellt) in Verbindung mit einer Cloud-Plattform, welche die Positionsdaten verarbeitet, ermöglichte dabei eine Nachverfolgung der Steigen und ein Monitoring der Bestände innerhalb der Obst-Supply Chain über ein Webinterface [Ver-2019].

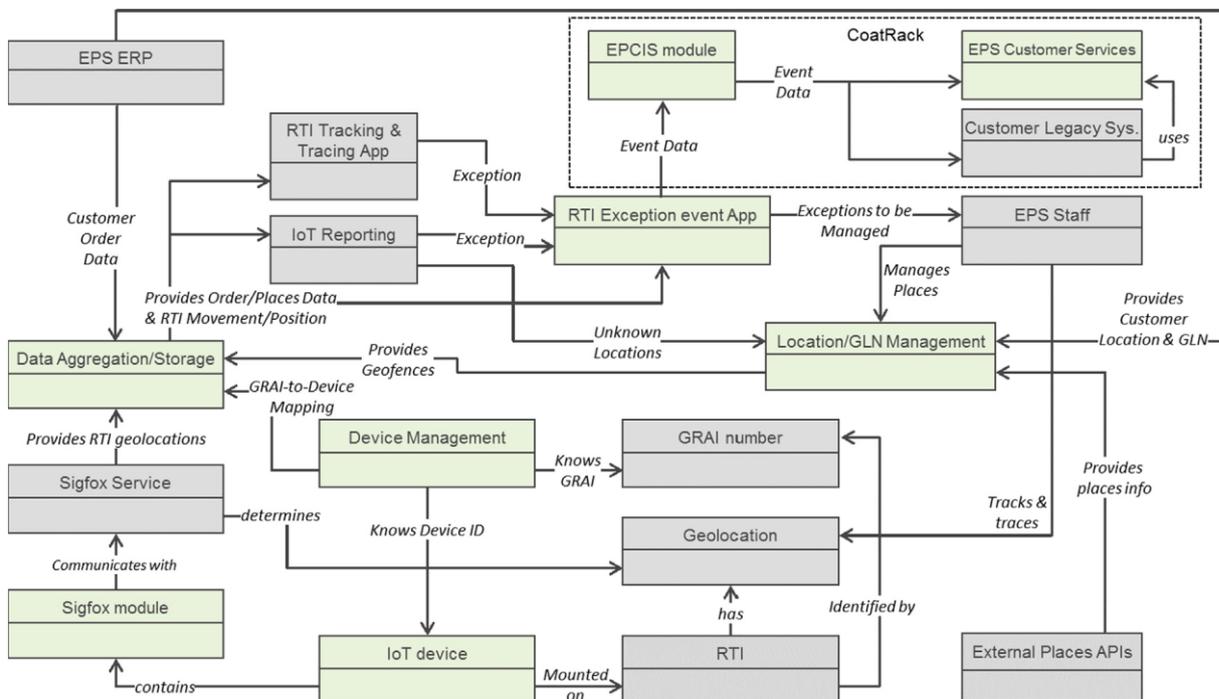


Abbildung 3-4: Domain Model Viewpoint für den Anwendungsfall „Intelligent Fruit Logistics“ [Ver-2019, S. 21]

Neben vier Ansätzen für branchenübergreifende Referenzarchitekturen wurden zwei spezifischere Architekturen in Verbindung mit intelligenten Behältern vorgestellt. Generell geben diese Architekturen hauptsächlich Richtlinien und Rahmenwerke für zukünftige IoT-Architekturen vor. Es fehlt jedoch eine konkrete Architektur, die die Potenziale von intelligenten, modularen Sonderladungsträgern erschließt und diese für die beteiligten Unternehmen des Behälterkreislaufs nutzbar macht. Fragestellungen zur Konzeption und Einführung von Services bzw. eines Service-Systems werden nur auf einer sehr generischen Basis beantwortet. Besonders der modulare Charakter des Ladungsträgers in Kombination mit einem unternehmensübergreifenden, datengetriebenen Service-System ist eine Herausforderung für die Architekturgestaltung, welche noch nicht tiefgehend untersucht wurde. Hier müssen u. a. Fragestellungen zur Integration von datenunterstützten physischen Services (z. B. Rekonfiguration) und den damit verbunden physischen Tätigkeiten innerhalb der Architektur geklärt werden. Auch wird das Thema der durchgängigen, unternehmensübergreifenden Datenerfassung entlang des Lebenszyklus eines intelligenten Ladungsträgers nur geringfügig adressiert (vgl. Tabelle 3-2). Die vorgestellten Forschungsarbeiten bilden allerdings

einen guten Ausgangspunkt für die Konzeption einer passenden Architektur für ein Service-System mit intelligenten, modularen Sonderladungsträgern. So können sowohl grundlegende Anforderungen an die Architektur und als auch Gestaltungsprinzipien für deren Konzeption übernommen werden.

Tabelle 3-2: Qualitative Bewertung der präsentierten Forschungsarbeiten des Themenbereichs „Referenzarchitekturen für das IoT“ hinsichtlich der eingeführten Kriterien

Publikation	Modulare Sonderladungsträger	IoT-Technologien am Ladungsträger	Durchgängige Erfassung von Daten	Einführung von Services	Unternehmensübergreifendes Service System	Architekturkonzept für Service-Systeme
[Ado-2015]	○	○	◐	○	◐	◑
[Sha-2019]	○	○	◐	○	◐	◑
[Ind-2019]	○	○	◐	○	◐	◑
[Bau-2013]	○	○	◐	○	◐	◑
[Iac-2019]	○	◐	◐	◐	◐	◑
[Ver-2019]	○	◐	◐	◐	◐	◑

- umfangreich behandelt
- ◑ viele Aspekte berücksichtigt
- ◐ einige Aspekte enthalten
- ◐ nur wenige Aspekte adressiert
- nicht Inhalt der Publikation

3.4 Intelligente Behälter in der Logistik

Ein intelligenter Behälter, der mit seiner Umwelt interagiert, kann bereits mit einem Auto-ID Verfahren wie RFID verwirklicht werden [Kag-2013, S. 85]. Die Potenziale, die sich dadurch ergeben, untersuchte bspw. die Volkswagen AG im Jahr 2006. Dabei wurden bei VW 13.000 Sonderladungsträger mit RFID-Transpondern ausgerüstet und mehrere RFID-Gates in drei Werken installiert. Durch diese Testinstallation wurden eine automatisierte, ereignisbasierte Verfolgung von Behältern innerhalb der Unternehmensgrenzen und so eine Erhöhung der Prozesstransparenz erzielt [Pel-2006; Ele-2006].

Auch das Verbundprojekt RAN (RFID-Based Automotive Network) entwickelte ein RFID-basiertes System zur Erhöhung der Transparenz in der Lieferkette und zur Steuerung von Produktions- und Logistikprozessen. Dabei wurden mit RFID-Transpondern ausgerüstete Behälter und Produkte zur ereignisbasierten Steuerung und Nachverfolgung der Wertschöpfungskette eingesetzt. Ein wichtiger Bestandteil des Systems war der sogenannte Infobroker, ein Datenbanksystem, welches einen standardisierten

Austausch prozessrelevanter Daten förderte. So sollte ein unternehmensübergreifender Datenaustausch zwischen Lieferanten, Dienstleistern und OEM ermöglicht werden (siehe Abbildung 3-5). Die Übertragung der Daten vom RFID-Transponder über das RFID-Gateway bis hin zum Infobroker basierte auf dem EPCIS-Standard (Electronic Product Code Information Services Standard, siehe [GS1-2016]). Dementsprechend baute die entworfene IT-Architektur auf dem EPCglobal Architecture Framework (siehe [GS1-2015]) auf. EPCIS wird oftmals in Zusammenhang mit RFID-Projekten (z. B. in [Gun-2011] oder [Wan-2014]) gewählt, da dieser offene Kommunikationsstandard ereignisbasierte Funktionalitäten und anwendungsspezifische Erweiterungen ermöglicht. Eine ereignisbasierte Funktionalität ist bspw. die Auslösung einer Behälterbewegungsbuchung bei der Erfassung eines bestimmten RFID-Transponders. Neben weiteren Use Cases wurde so im Verbundprojekt RAN für das Behältermanagement ein ereignisbasiertes Tracking¹⁷ und Tracing¹⁸ realisiert. Die prototypisch implementierte RFID-Infrastruktur legte dafür die erfassten Ereignisse, also die Identifikation von Behältern bei der Durchfahrt durch ein RFID-Gate, in einer Datenbank ab. Aufbauend auf diesen Daten wurden, neben der Verfolgung der aktuellen Position, Kennzahlen (z. B.

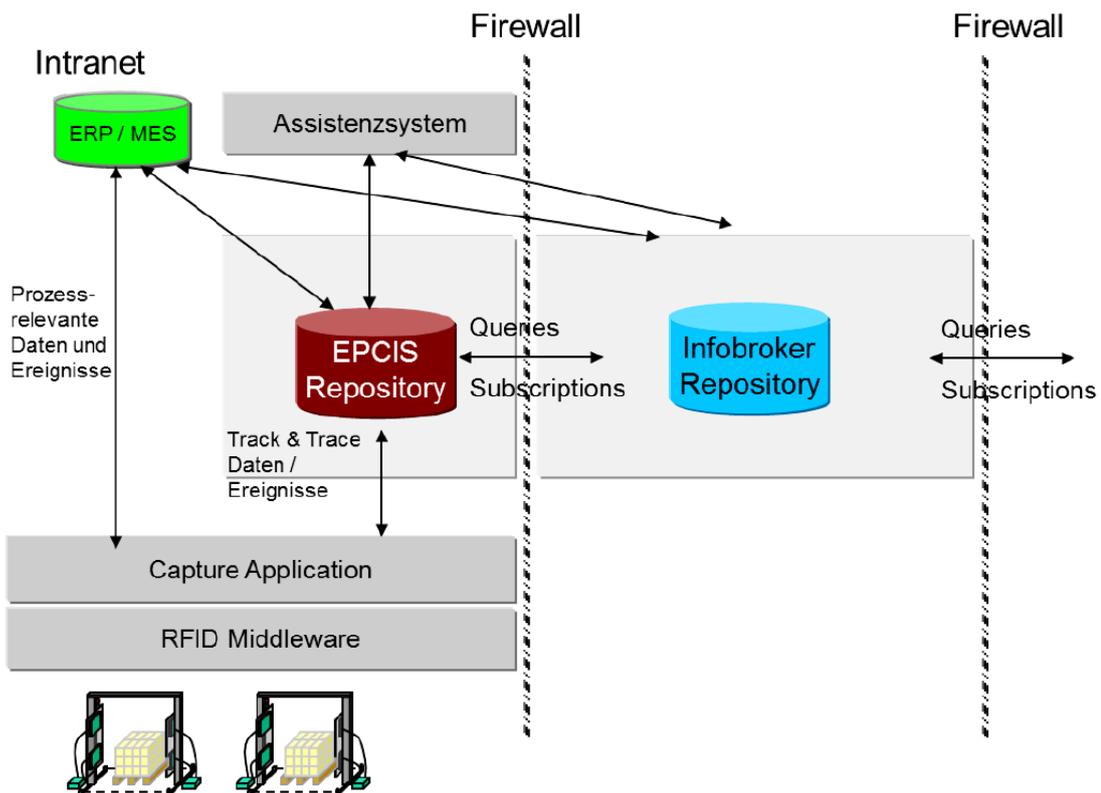


Abbildung 3-5: Datenübertragung vom RFID-Gate über das Intranet bis zum Infobroker [BIB-2013, S. 51]

¹⁷ Tracking: Bestimmung der aktuellen Position [Klu-2018, S. 397].

¹⁸ Tracing: Zeitlich versetzte Nachverfolgung der Position anhand des aufgezeichneten Positionsverlaufs [Klu-2018, S. 397].

Durchlaufzeiten) ermittelt, Soll- und Ist-Zustände (z. B. Bestände) überwacht und Handlungsempfehlungen generiert. Zudem wurde die Automatisierung von manuellen Aufgaben, wie bspw. die Buchung von Behälterbewegungen, untersucht [Rei-2013; Sch-2013a; Sch-2013b].

Ähnlich wie im Projekt *RAN* wurde der Einsatz von RFID als ereignisbasiertes Tracking und Tracing von Ladungsträgern in vielen weiteren Forschungsarbeiten untersucht (vgl. [Cho-2007; IBM-2010; Gun-2011; Fra-2014]). Dabei stand die automatisierte Erfassung von Behältern innerhalb des Werksgeländes und die Verwendung der gewonnenen Daten zur Transparenzsteigerung des Behälterflusses im Vordergrund. *Oliveira et al.* kombinierte darüber hinaus die zur Erfassung notwendige RFID-Hardware mit einem GPS-fähigen Smartphone, um auch außerhalb der Unternehmensgrenzen eine Nachverfolgung der Ladungsträger zu ermöglichen. Durch die Integration der entwickelten Hardware in einen LKW konnte der Nutzer bei einer Abweichung des Transports von der ursprünglich geplanten Route benachrichtigt werden [Oli-2015].

Prives und *Wang* entwickelten für die Frische- und Tiefkühllogistik einen intelligenten Thermobehälter, der ein ereignisbasiertes Tracking und Tracing über die gesamte Supply Chain bei gleichzeitiger Überwachung der Einhaltung der Kühlkette ermöglichte. Für die Implementierung des Prototyps wurden Thermobehälter mit RFID-Transpondern, als Identifikations- und Kommunikationsschnittstelle, und einem Temperatursensor ausgerüstet. Durch diese Kombination konnten die Behälterinnentemperatur erfasst und die Messdaten automatisch übermittelt werden. Bei den durchgeführten Versuchen wurde die ereignisbasierte Datenübertragung von Temperaturverläufen und Behälterkennzeichnung bei der Gate-Durchfahrt mittels der installierten Kommunikations- und Identifikationsinfrastruktur realisiert (siehe Abbildung 3-6). So konnte für den intelligenten Thermobehälter, basierend auf den generierten EPCIS-Events und zugewiesenen Schlüsselprozessen, die Bewegungsprofile, das Monitoring

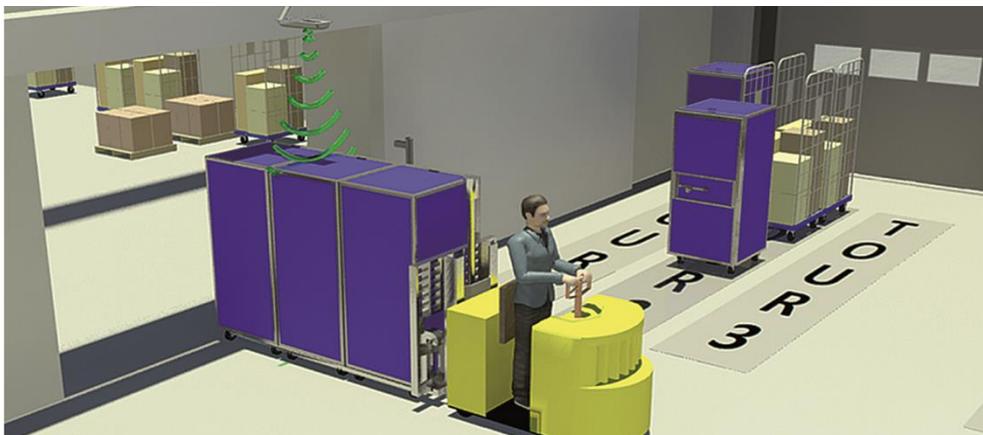


Abbildung 3-6: Durchfahrt von intelligenten Thermobehältern durch ein RFID-Gate [Pri-2016, S. 146]

von Beständen und die Dokumentation der Kühlkette implementiert werden. Außerdem wurden die Daten den Teilnehmern der Supply Chain über eine Webapplikation zur weiteren Auswertung (z. B. zur Bestimmung von Aufenthaltsdauern oder der Durchlaufzeiten) bereitgestellt [Pri-2016; Wan-2014].

Im Forschungsprojekt *DProdLog* wurde eine modulare Serviceplattform zur Digitalisierung produktionslogistischer Dienstleistungen entwickelt. Diese Plattform zielte auf eine einfache Integration von intelligenten Behältern und die schnelle Implementierung zugehöriger datenbasierter Dienstleistungen ab. Im Fokus des Projekts war die Entwicklung eines unternehmensübergreifenden, dienstleistungsbasierten C-Teile-Managements, ausgehend von intelligenten KLTs. Dabei standen Dienstleistungen zur automatischen Nachverfolgung von Behältern und Ware, zur Identifikation von Störungen und zur automatischen Nachbestellung der Ware im Vordergrund. Um diese Funktionalitäten in einer bestehenden Lieferkette erbringen zu können, wurden für den Prototyp die KLTs mit RFID-Transpondern, einem Funkmodul und Füllstandsensoren ausgerüstet. Ein IT-Dienstleister, der die Plattform verwaltete, diente im Projekt als Bindeglied zwischen den beteiligten Partnern der Lieferkette. Über die vom Dienstleister bereitgestellte Webplattform, konnten die beteiligten Akteure u. a. einsehen, welche Aufträge automatisch durch die Füllstandüberwachung ausgelöst wurden [Gol-2019].

Sydow entwickelte in seiner Dissertation ein Konzept zur dynamischen Behälterlogistik in der Automobilindustrie, welches u. a. auf dem Einsatz von Bluetooth Low Energy (BLE) beruhte. Dabei zeigte er, basierend auf einer Literaturanalyse, die Potenziale von mit BLE ausgerüsteten Ladungsträgern im Leergutversorgungsprozess auf. Der entwickelte Algorithmus, welcher eine dynamische und teilautomatisierte Behälterversorgung von Lieferanten ermöglicht, nutzte eine auf den Behälterbestellungen der Lieferanten und den Daten von BLE-Transpondern basierende Bestandsprognose. Für den Einsatz des Algorithmus wurde zusätzlich eine Visualisierung entwickelt, welche die Informationen zur Behälterversorgung und das Monitoring der Bestandsprognose für den Mitarbeitenden darstellte. Der Algorithmus zur teilautomatisierten Behälterversorgung wurde mithilfe einer ereignisdiskreten Simulation evaluiert. Versuche mit den mit BLE ausgerüsteten KLTs beschränkten sich jedoch rein auf Untersuchungen zu Interferenzen zwischen Wireless Local Area Network (WLAN) und BLE [Syd-2017].

Das Projekt *CairGoLution* entwickelte einen intelligenten Luftfrachtcontainer. Dabei lag der Fokus auf der Erkennung von Integritätsverletzungen entlang der Luftfrachtkette, wie bspw. Diebstahl oder unbefugtes Öffnen des Behälters. Ausschlaggebend waren hier die Vorgaben für die „sichere Lieferkette“ (vgl. [Kur-2018]), welche fordern, dass die Fracht gegen unbefugten Zugriff und Manipulationen durch entsprechende Sicherheitsmaßnahmen zu schützen ist. Zu diesem Zweck wurden die Luftfrachtcontainer

(eng. Unit Load Device, ULD) mit einem Telematik-Modul und einem sogenannten „Smart Seal“ ausgerüstet. Über einen Reedschalter¹⁹ konnte das „Smart Seal“ den Öffnungszustand des ULD überwachen und bei einem unbefugten Zugriff die Integritätsverletzung melden. Die aktuelle Position und die Daten des „Smart Seal“ wurden über UMTS weltweit an das entwickelte Back-End gesendet. Die auf dem Back-End implementierten Algorithmen berechneten anschließend, ob das Öffnen des ULD eine Integritätsverletzung darstellte oder nicht. Wurde der Luftfrachtcontainer unerlaubt geöffnet, erfolgte eine aktive Benachrichtigung des Nutzers. Zudem ermöglichte die im Projekt entwickelte Webplattform einen Überblick über aktuelle Positionen und Sicherheitseinstellungen der ULDs [Mün-2016; Pfo-2016].

Im Projekt *Service-orientiertes Logistikkonzept für ein multifunktionales Behältersystem (SOBS)* wurde ein intelligenter Behälter entwickelt, der ein Echtzeit-Monitoring des Zustands und eine Benachrichtigung bei unerlaubter Öffnung durchführen konnte. Das entwickelte Konzept sah vor, Behälterbewegungen zentral bei jedem Zu- und Abgang zu erfassen, um neben einem Bestands-Monitoring ein ereignisbasiertes Tracking und Tracing zu ermöglichen. Dafür wurde ein KLT mit einem RFID-Transponder, einem QR-Code, einem Barcode, einem GSM-Modul (Global System for Mobile Communications-Modul), einem Bildschirm und Sensoren für Temperatur- und Luftdrucküberwachung ausgestattet (siehe Abbildung 3-7). Neben der Übertragung der Messdaten an die entwickelte Plattform über das GSM-Netz wurden die aktuellen Sensordaten mithilfe des integrierten Bildschirms angezeigt. Basierend auf den Sensorwerten konnte außerdem eine Benachrichtigung (eine SMS-Nachricht mit Sensorwerten und Positionsangaben) bei unerlaubter Öffnung des Behälters ausgelöst werden. Ebenso konnten auf der implementierten Plattform Warenbewegungen verbucht und die Messdaten der Sensorik visualisiert werden [Lam-2013].

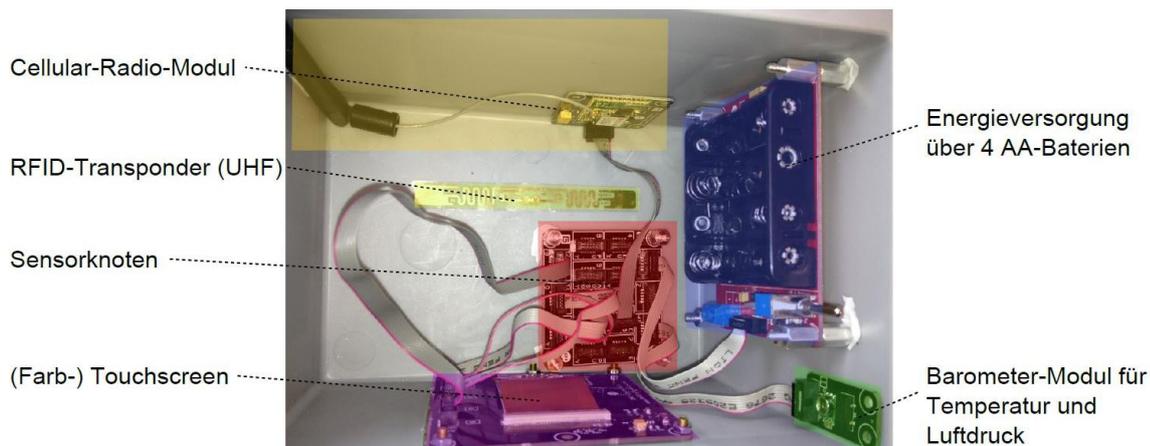


Abbildung 3-7: Integration diverser Technologien in einen KLT im Projekt SOBS [Lam-2013, S. 91]

¹⁹ Ein Reedschalter reagiert auf Magnetfelder. Erreicht das umgebende Magnetfeld einen vorgegeben Grenzwert, wird der Kontakt geschlossen [Bau-2019, S. 159].

Hinter dem Namen *inBin* verbirgt sich ein weiterer intelligenter Behälter für den Einsatz in der Logistik. Dabei handelt es sich um einen mit Energy-Harvester (bspw. Solarzellen), Energiepuffer, Microprozessor, Funkmodul, Display und Sensoren ausgerüsteten Ladungsträger. Durch diesen umfangreichen Einsatz von IuK-Technologie kann der Behälter neben der Überwachung der Umgebungsbedingungen direkt mit Menschen und Maschinen in seinem Umfeld kommunizieren. Hierfür nutzt der *inBin* ein Display, Knöpfe und gängige Funkstandards, wodurch er den menschlichen Nutzer bspw. beim Kommissioniervorgang unterstützen kann. Da der Einsatz einer solchen IuK-Infrastruktur direkt am Behälter energieintensiv ist, wurde bei der Entwicklung ein besonderes Augenmerk auf den Energie-Harvester gelegt. Dieser versucht im logistischen Umfeld mithilfe von Licht (Solarzellen) und Vibrationen genug Energie zu erzeugen, um den Batteriewechsel möglichst lange hinauszuzögern [Emm-2012; Roi-2014].

Piest et al. realisierte eine prototypische Anwendung der in Abschnitt 3.3 genannten SSLEA, basierend auf intelligenten Mehrwegpaletten. Ziel der Forschungsarbeiten war eine praxisnahe Demonstration der situationsgerechten Entscheidungsunterstützung, aufbauend auf einer analytischen Auswertung von IoT-Daten. Dafür wurden Kunststoffpaletten mit einem Sensorknoten, bestehend aus einem BLE-Funkmodul, Beschleunigungs-, Temperatur-, Gewichts- und Luftfeuchtigkeitssensoren, ausgerüstet und in einen geschlossenen Kreislauf eingeschleust. Die in die Palette integrierte Sensorik erfasste während des Kreislaufs Messdaten und übermittelte diese mithilfe der BLE-Infrastruktur (fest installierte BLE-Gateways oder mit speziellen Applikationen ausgerüstete Smartphones) an eine Cloud-Plattform. Dort wurden die Daten aufbereitet und über eine Webanwendung visualisiert. So konnte eine genaue Positionsbestimmung der Palette innerhalb des Testfelds realisiert werden. Neben der Verfolgung von aktuellen Positionen konnte der Nutzer Grenzwerte (bspw. für Temperaturen) festlegen, bei deren Überschreitung eine Benachrichtigung ausgelöst wurde [Pie-2020].

Die Forschungen von *Neal et al.* konzentrierten sich auf einen intelligenten Mehrwegbehälter (smaRTI – smart Returnable Transit Item), der, als Bestandteil der Industrie 4.0, mit seiner Ladung (intelligente Bauteile), mit Maschinen und mit intelligenten Fertigungsanlagen interagieren und selbständig Entscheidungen treffen konnte. Das am Behälter angebrachte IoT-Device bestand aus einem RFID-Reader zur Identifikation der geladenen Bauteile und einer WLAN-Kommunikationseinheit für die Übermittlung von Daten an das Back-End oder an ein anderes CPS. Des Weiteren waren neben einem Datenspeicher und einer Datenverarbeitungseinheit Sensoren für Beschleunigung, Temperatur und Feuchtigkeit, ein Gyroskop, ein Kompass, ein Höhenmesser, eine Batterie und ein OLED-Bildschirm auf der Steckplatine verbaut. Durch die am Behälter angebrachte Rechenkapazitäten, konnten Daten dezentral verarbeitet

und anschließend Entscheidungen bzgl. der aktuellen Ladung durch den smaRTI getroffen werden. Hier lag auch der Fokus der Forschungsarbeit. So sollte der intelligente Behälter ein Teil des CPPS werden und ladungsabhängig Entscheidungen für die nächsten Produktionsschritte der geladenen Bauteile treffen. Die in den Forschungsarbeiten entwickelte Architektur für die Integration von intelligenten Behältern und intelligenten Produkten in ein Produktionssystem erweiterte die klassische SOA um den *Asset Layer* und den *Integration Layer* von RAMI4.0. So konnten intelligente Systeme mit einer service-orientierten Struktur verbunden werden. Innerhalb des Projekts wurde ein geeigneter Proof-of-Concept für Hardware und Software, in welchem speziell die Identifikation von geladenen Bauteilen via UHF-RFID und die Überwachung von Handhabungsprozessen mithilfe der Sensorik untersucht wurde, unter Laborbedingungen durchgeführt. Dabei konnten die Messdaten und Benachrichtigungen über eine Webapplikation eingesehen werden. Der Einsatz dieses IoT-Devices war sehr kosten- und energieintensiv, weswegen die Implementierung des Systems in einer aktiven Supply Chain nicht durchgeführt werden konnte [Nea-2019].

Aufbauend auf [Nea-2019] veröffentlichten *Neal et al.* eine weitere Forschungsarbeit, die den Einsatz von mit RFID-Transpondern ausgerüsteten Behältern zur Steuerung der Qualitätssicherungsprozesse und Überwachung der Prozesseinhaltung anhand einer konkreten Implementierung betrachtete. Dabei wurden der Versorgungsprozess der Montage mit Motorteilen und der zugehörige Waschprozess der Behälter genauer untersucht. Für die Implementierung des Prototyps wurden sowohl die Ladungsträger als auch die Kunststoffseparatoren (Kunststoffeinlagen zum Transport der Motorteile) mit RFID-Transpondern ausgerüstet. Als IuK-Infrastruktur wurden vier RFID-Gates an verschiedenen Toren und Zufahrten im Werk und an der Waschanlage installiert. Um die Bewegungen der Behälter und Kunststoffeinlagen zu erfassen und so ein ereignisbasiertes Tracking zu ermöglichen, wurde die in [Nea-2019] vorgestellte Architektur für den ausgewählten Anwendungsfall konkretisiert. So konnten durch die Erfassung der RFID-Transponder und der im Projekt entwickelten grafischen Oberfläche dem Nutzer die aktuellen Behälterbestände innerhalb der einzelnen Produktionszonen angezeigt werden (siehe Abbildung 3-8). Weiter wurden die RSSI-Werte des RFID-Aufbaus und die durchschnittliche Staplergeschwindigkeit zwischen den einzelnen Gates berechnet und grafisch dargestellt. Auch eine Auswertung der Durchlaufzeiten und der einzelnen Prozesszeiten der Behälter konnte durch den Nutzer anhand der erhobenen Daten durchgeführt werden. Bzgl. des Waschprozesses konnten Waschzyklen und die Zeitspanne zwischen den einzelnen Waschvorgängen je Behälter überwacht werden. Jedoch zeigte die Implementierung einige Schwächen wie z. B. falsche positive Erfassungen der RFID-Transponder, welche auf den Infrastrukturaufbau der RFID-Gates zurückzuführen waren [Nea-2021].

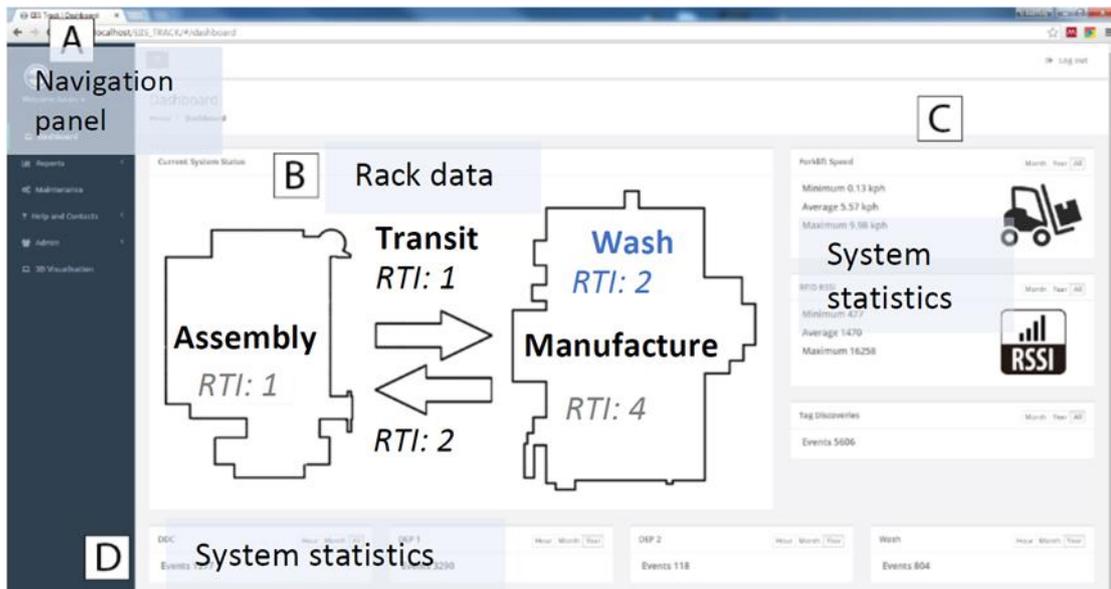


Abbildung 3-8: Entwickeltes Dashboard mit aktuellen Behälterbeständen (B), statistischen Auswertungen (C,D) und Navigationsmenü (A) [Nea-2021, S. 470]

Weitere Forschungsarbeiten legen ihren Untersuchungsschwerpunkt auf intelligente Schiffscontainer (vgl. [Ruc-2018; Lan-2011; Kim-2008]). Auf diese wird allerdings nicht genauer eingegangen, da sich der Überseetransport von Containern bzgl. der Anforderungen deutlich von einem Behälterkreislauf in der Automobilindustrie unterscheidet.

Die in diesem Abschnitt präsentierten Forschungsprojekte fokussieren sich auf intelligente Behälter (vgl. Tabelle 3-3). Innerhalb dieser Arbeiten wurden Ladungsträger mit diversen Identifikations- und Kommunikationstechnologien sowie Sensorik ausgestattet. Anhand der so gewonnenen Daten wurden von einem einfachen ereignisbasierten Tracking und Tracing bis hin zur ladungsbasierten Entscheidungsfindung diverse Anwendungen umgesetzt. Die Herausforderungen und Potenziale einer Kombination von Modularität (in Bezug auf den Ladungsträger) und diversen IT-Technologien wurden jedoch nicht untersucht. Dementsprechend werden die durchgängige Datenerfassung innerhalb des Lebenszyklus eines modularen Behälters, beeinflusst durch die Wiederverwendung einzelner Module und die damit verbundene Einführung von datenbasierten und datenunterstützten physischen Diensten, nicht tiefergehend adressiert. Auch fehlen weitreichende Untersuchungen zum Aufbau eines, auf intelligenten, modularen Sonderladungsträgern basierenden, unternehmensübergreifenden Service-Systems und der damit einhergehenden Architektur. So bleiben Fragestellungen zum Zusammenwirken der Akteure und Ressourcen, zur Regelung der Berechtigungen und zu unternehmensübergreifenden Datenflüssen weitgehend unbeantwortet. Des Weiteren ist hervorzuheben, dass die in den Forschungsarbeiten aufgestellten branchenabhän-

gigen Anforderungen (z. B. Luftfracht, Lebensmittellogistik) an den intelligenten Behälter und die entwickelten Funktionsumfänge und Services nicht immer direkt auf den Behälterkreislauf in der Automobilindustrie übertragbar sind.

Tabelle 3-3: Qualitative Bewertung der präsentierten Forschungsarbeiten des Themenbereichs „intelligente Behälter in der Logistik“ hinsichtlich der eingeführten Kriterien

Publikation	Modulare Sonderladungsträger	IoT-Technologien am Ladungsträger	Durchgängige Erfassung von Daten	Einführung von Services	Unternehmensübergreifendes Service System	Architekturkonzept für Service-Systeme
[Pel-2006] [Ele-2006]	○	◐	◐	○	○	○
[Rei-2013] [Sch-2013a] [Sch-2013b]	○	◐	◑	◐	◐	◑
[Oli-2015]	○	◐	◑	◐	○	○
[Pri-2016] [Wan-2014]	○	◑	◑	◐	◐	◐
[Gol-2019]	○	◑	◐	◑	◐	◐
[Syd-2017]	○	◐	◐	◐	○	○
[Mün-2016] [Pfo-2016]	○	◑	◐	◐	○	◐
[Lam-2013]	○	◑	◐	◐	○	○
[Emm-2012] [Roi-2014]	○	◑	◐	○	○	○
[Pie-2020]	○	◑	◑	◐	◐	◐
[Nea-2019]	○	◑	◐	◐	○	◑
[Nea-2021]	○	◐	◐	◐	○	◑

- umfangreich behandelt
- ◑ viele Aspekte berücksichtigt
- ◐ einige Aspekte enthalten
- ◐ nur wenige Aspekte adressiert
- nicht Inhalt der Publikation

4 Forschungsbedarf und methodische Vorgehensweise

Aufbauend auf dem in Kapitel 3 präsentierten Stand der Wissenschaft und Technik, wird im Folgenden die resultierende Forschungslücke konkretisiert. Anschließend werden die sich daraus ergebenden Forschungsfragen formuliert und das wissenschaftliche Vorgehen zur Beantwortung der Fragestellungen beschrieben. Für diese Arbeit gilt, unter Einbezug der Erkenntnisse aus Kapitel 3, folgende Definition für einen intelligenten, modularen Sonderladungsträger: „Ein intelligenter, modularer Sonderladungsträger ist ein aus wiederverwendbaren Modulen bestehender Sonderladungsträger, der mit seiner Umwelt interagieren kann. Weiterführende Datenerfassungs-, Kommunikations- und Verarbeitungskapazitäten können, müssen aber nicht zwingend Teil eines intelligenten, modularen Sonderladungsträgers sein.“

4.1 Konkretisierung der Forschungslücke und Ableitung der Forschungsfragen

Es gibt bereits einige Arbeiten in der Wissenschaft und Technik, die spezielle Teilgebiete der in Kapitel 1 beschriebenen Problemstellung aus der Praxis adressieren. Die dabei noch bestehenden Defizite in Hinblick auf die Zielsetzung dieser Arbeit wurden bereits in Abschnitt 3.2, Abschnitt 3.3 und Abschnitt 3.4 diskutiert. Die zusammenfassende Bewertung der vorgestellten Publikationen anhand der sechs aufgestellten Bewertungskriterien ist in Tabelle 4-1 dargestellt (Zusammenfassung von Tabelle 3-1, Tabelle 3-2 und Tabelle 3-3). Diese Übersicht zeigt, dass ein ganzheitliches Konzept fehlt, welches die technische Dimension eines intelligenten, modularen Sonderladungsträgers (z. B. Identifikation, Sensorintegration, Rekonfiguration und Wiederverwendung) mit einem unternehmensübergreifenden und datengetriebenen Service-System (z. B. Angebot von Services zur Erhöhung der Supply Chain-übergreifenden Transparenz von Beständen oder Reparaturprozessen, Lebenszyklusüberwachung einzelner Module) verbindet. Dementsprechend mangelt es noch an Untersuchungen bzgl. unternehmensübergreifender Dienste, welche die Potenziale von intelligenten, modularen Sonderladungsträgern von der Herstellung über den Einsatz bis hin zum Ende des Lebenszyklus der einzelnen Module (abgekoppelt vom Lebenszyklus des Ladungsträgers) ausschöpfen. Darüber hinaus fehlen Erläuterungen in Bezug auf die Ausgestaltung eines Service-Systems, welches die Daten von intelligenten, modularen Sonderladungsträgern nutzt, um datenbasierte und datenunterstützte physische Services anzubieten. Welche Daten für solche Services benötigt werden und wie eine

durchgängige, unternehmensübergreifende Datenerfassung, sowohl innerhalb des Behälterkreislaufs als auch entlang des gesamten Lebenszyklus ermöglicht werden kann, wurde ebenfalls noch nicht erforscht. Zudem fehlen wissenschaftliche Veröffentlichungen zur konkreten Ausgestaltung und zum Aufbau einer Architektur, welche diese Dienste erbringen kann und so die damit verbundenen Potenziale für die beteiligten Unternehmen des Behälterkreislaufs nutzbar macht. Hier wurden u. a. Fragestellungen zur Integration der Services und zur Regelung der unternehmensübergreifenden Ressourcen, Datenflüsse, Berechtigungen und Rollen noch nicht ausreichend untersucht.

Tabelle 4-1: Qualitative Bewertung der adressierten Umfänge innerhalb der präsentierten Forschungsarbeiten in Bezug auf die eingeführten Bewertungskriterien

Publikation	Modulare Sonderladungsträger	IoT-Technologien am Ladungsträger	Durchgängige Erfassung von Daten	Einführung von Services	Unternehmensübergreifendes Service System	Architekturkonzept für Service-Systeme
[Kam-2011] [Sch-2012]	●	○	○	◐	◐	○
[Att-2011]	◐	○	○	◐	◐	○
[Kam-2012] [Bur-2011]	●	◐	◐	◐	◐	○
[Ros-2016]	◐	○	○	○	○	○
[Mei-2015] [Hub-2013]	◐	○	○	○	○	○
[Ado-2015]	○	○	◐	○	◐	●
[Sha-2019]	○	○	◐	○	◐	●
[Ind-2019]	○	○	◐	○	◐	●
[Bau-2013]	○	○	◐	○	◐	●
[Iac-2019]	○	◐	◐	◐	◐	●
[Ver-2019]	○	◐	◐	◐	◐	●
[Pel-2006] [Ele-2006]	○	◐	◐	○	○	○
[Rei-2013] [Sch-2013a] [Sch-2013b]	○	◐	◐	◐	◐	◐
[Oli-2015]	○	◐	◐	◐	○	○
[Pri-2016] [Wan-2014]	○	◐	◐	◐	◐	◐
[Mün-2016] [Pfo-2016]	○	◐	◐	◐	○	◐

Publikation	Modulare Sonderladungsträger	IoT-Technologien am Ladungsträger	Durchgängige Erfassung von Daten	Einführung von Services	Unternehmensübergreifendes Service System	Architekturkonzept für Service-Systeme
[Lam-2013]	○	◐	◑	◑	○	○
[Emm-2012] [Roi-2014]	○	◑	◑	○	○	○
[Pie-2020]	○	◑	◑	◑	◑	◑
[Nea-2019]	○	◑	◑	◑	○	◑
[Nea-2021]	○	◑	◑	◑	○	◑

- umfangreich behandelt
 - ◑ viele Aspekte berücksichtigt
 - ◐ einige Aspekte enthalten
 - ◑ nur wenige Aspekte adressiert
 - nicht Inhalt der Publikation
- Fokus auf modulare Sonderladungsträger
 - Fokus auf Referenzarchitekturen für das IoT
 - Fokus auf intelligente Behälter in der Logistik

Aufbauend auf der identifizierten Forschungslücke werden die wissenschaftlichen Fragestellungen für diese Arbeit formuliert. Dabei lautet die leitende Forschungsfrage:

Wie gestaltet sich eine Architektur, die die Erbringung von datenbasierten und datenunterstützten physischen Services in einem unternehmensübergreifenden Service-System mit intelligenten, modularen Sonderladungsträgern ermöglicht?

Diese übergeordnete Fragestellung lässt sich weiter untergliedern in drei Teilfragen:

- *Welche datenbasierten und datenunterstützten physischen Services sind für das Behältermanagement eines unternehmensübergreifenden Behälterkreislaufs mit intelligenten, modularen Sonderladungsträgern sinnvoll?*
- *Welche Funktionen, Daten und Kommunikationsabläufe müssen innerhalb der Architektur für den Einsatz dieser Services berücksichtigt werden?*
- *Wie müssen die Systemarchitektur und das Berechtigungskonzept für den unternehmensübergreifenden Einsatz des Service-Systems strukturiert werden?*

Die Beantwortung der gestellten Forschungsfragen zielt darauf ab, die identifizierte Forschungslücke zu schließen und die aus der Praxis abgeleitete Zielsetzung dieser Arbeit, die *Konzeption einer Architektur für den unternehmensübergreifenden Behälterkreislauf, die die Potenziale von intelligenten, modularen Sonderladungsträgern erschließt und diese für Unternehmen nutzbar macht* (siehe Abschnitt 1.2), zu erreichen. Hierdurch soll sowohl ein Beitrag für die Forschung als auch für die Praxis geleistet werden.

4.2 Beschreibung des übergeordneten wissenschaftlichen Vorgehens

Zur Beantwortung der Forschungsfragen und zur Erreichung der Zielsetzung, wird eine strukturierte, iterative Vorgehensweise in Anlehnung an die Design Research Methodology von *Blessing und Chakrabarti* gewählt (vgl. [Ble-2009, S. 14ff.]). Die Design Research Methodology unterstützt den Zielerreichungsprozess mit ihrem wissenschaftlich strukturierten und zielgerichteten Rahmenwerk. So kann die dieser Arbeit zugrundeliegende Vorgehensweise (siehe Abbildung 4-1, Seite 67) in die von *Blessing und Chakrabarti* vorgeschlagenen vier übergeordneten Phasen *Research Clarification*, *Descriptive Study I*, *Prescriptive Study* und *Descriptive Study II* aufgegliedert werden (vgl. [Ble-2009, S. 14ff.]). Trotz der linearen Darstellung in Abbildung 4-1 sind innerhalb des erstellten Vorgehens Rückschritte und beliebige Iterationsschleifen zulässig. Im Folgenden werden die einzelnen Vorgehenschritte, ohne die durchgeführten Iterationsschleifen, dargestellt und der Struktur der Arbeit zugeordnet.

Die Durchführung der Vorgehensweise begann mit der *Research Clarification*, der Klärung und Eingrenzung des Forschungsgegenstandes. Hierzu wurden neben den Herausforderungen aus der industriellen Praxis die konkreten Problemstellungen des Behältermanagements in der Automobilindustrie identifiziert (siehe Kapitel 1). Diese Erkenntnisse dienen zur Konkretisierung des aktuellen Handlungsbedarfs und zur Ableitung der Zielsetzung dieser Arbeit: die *Konzeption einer Architektur für den unternehmensübergreifenden Behälterkreislauf, die die Potenziale von intelligenten, modularen Sonderladungsträgern erschließt und diese für Unternehmen nutzbar macht* (siehe Abschnitt 1.2). Für ein grundlegendes Verständnis in Bezug auf das gewählte Forschungsgebiet wurden anschließend relevante Grundlagen recherchiert und in Kapitel 2 zusammenfassend dargestellt.

Die darauffolgende *Descriptive Study I* begann mit einer strukturierten Literaturrecherche des aktuellen Stands der Wissenschaft und Technik, um die Forschungslücke in Bezug auf die identifizierte Zielsetzung einzugrenzen. Für die Bewertung der recherchierten Arbeiten wurden, basierend auf der Zielstellung dieser Arbeit, sechs Bewertungskriterien definiert (siehe Abschnitt 3.1). Anhand dieser Bewertungskriterien konnten die gefundenen Forschungsarbeiten eingeordnet und die daraus resultierende Forschungslücke konkretisiert werden (siehe Abschnitt 3.2 bis Abschnitt 3.4 und Abschnitt 4.1). Um die identifizierte Forschungslücke zu schließen, wurden vier Forschungsfragen abgeleitet (siehe Kapitel 4). Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird die darauf aufbauende Ist-Analyse eines Fallbeispiels aus der Automobilindustrie durchgeführt. Die Ist-Analyse verfolgt das Ziel, die aktuellen Prozesse der Behälterentwicklung, -herstellung und des Behältereinsatzes zu untersuchen und Schwachstellen zu ermitteln

(siehe Abschnitt 5.1 und Abschnitt 5.2). Zusätzlich wird ein tiefergehendes Verständnis der aktuellen Situation in Bezug auf das gewählte Forschungsziel erreicht.

Anschließend wird innerhalb der sogenannten *Prescriptive Study* mit der Konzeptentwicklung begonnen. Um die ermittelten Schwachstellen zu beheben, werden in einem ersten Schritt Anforderungen an die Zielsetzung aufgestellt (siehe Abschnitt 5.3). Zur Begegnung der in Abschnitt 1.1 beschriebenen Herausforderungen und aufbauend auf den identifizierten Anforderungen werden Funktionsumfänge und Services zur Unterstützung des Behältermanagements erarbeitet (siehe Unterabschnitt 6.2.1). Diese werden anschließend anhand ihres zu erzielenden Nutzens kategorisiert (siehe Unterabschnitt 6.2.2). Des Weiteren werden die für den Einsatz der Services benötigten Daten identifiziert. Zur Abbildung der implementierungsunabhängigen Struktur der Daten sowie deren Beziehungen wird ein unternehmensübergreifendes Datenmodell entworfen (siehe Abschnitt 6.3). Aufbauend auf diesen Ergebnissen wird die unternehmensübergreifende Architektur erstellt (siehe Abschnitt 6.4). Sie verfolgt das Ziel, die erarbeiteten Ergebnisse zu vereinen, die grundlegenden Strukturen des Service-Systems zu definieren und die Komponenten, deren Beziehungen und Eigenschaften abstrahiert darzustellen. Um die unternehmensübergreifende Nutzung des Service-Systems zu ermöglichen, wird ein Berechtigungskonzept aufgestellt (siehe Abschnitt 6.5). Das Berechtigungskonzept wird neben den benötigten Ressourcen und Informationsflüssen direkt mit in den Aufbau der Architektur integriert. Die *Prescriptive Study* endet mit dem erstellten Architekturkonzept für ein unternehmensübergreifendes Service-System mit intelligenten, modularen Sonderladungsträgern.

Der Evaluierungsfokus der *Descriptive Study II* liegt auf dem Architekturkonzept aus der *Prescriptive Study*. Um die Umsetzbarkeit und Anforderungserfüllung der Architektur zu überprüfen, wird diese prototypisch implementiert und es werden Labor- und Feldexperimente durchgeführt (siehe Abschnitt 7.2 und Abschnitt 7.3). Der Nutzen der entwickelten Lösung in Bezug auf die eingangs formulierten Herausforderungen wird anhand einer Umfrage bewertet (siehe Abschnitt 7.4). Darauf aufbauend werden die gestellten Forschungsfragen beantwortet und es wird ein evaluationsübergreifendes Fazit gezogen (siehe Abschnitt 7.5). Die *Descriptive Study II* schließt die Arbeiten mit einer kurzen Zusammenfassung der Ergebnisse und der Ableitung des weiteren Forschungsbedarfs (siehe Kapitel 8) ab.

Innerhalb der einzelnen Schritte des übergeordneten wissenschaftlichen Vorgehens werden jeweils geeignete Methoden (u. a. Experteninterview, Prozessanalyse, Daten- und Funktionsmodellierung) eingesetzt. Diese werden neben einer weiteren Detaillierung der durchgeführten Vorgehensschritte direkt zu Beginn der jeweiligen Kapitel vorgestellt (siehe Abschnitt 5.1, Abschnitt 6.1 und Abschnitt 7.1). In die Konzeption und

Bewertung des Service-Systems für intelligente, modulare Sonderladungsträger und der damit verbundenen Architektur fließen darüber hinaus Ergebnisse des durch den Ersteller dieser Doktorarbeit bearbeiteten Forschungsprojekts iSLT.NET (Netzwerk für intelligente, modulare Sonderladungsträger, vgl. [Zei-2018] und [Gra-2020]) mit ein. Gleichzeitig finden auch eine enge Zusammenarbeit und eine regelmäßige Abstimmung mit Experten aus dem Behältermanagement und der Plattformentwicklung statt. So können bereits in der Konzeptionsphase (*Prescriptive Study*) Zwischenschritte bewertet und Iterationsschleifen angestoßen werden.

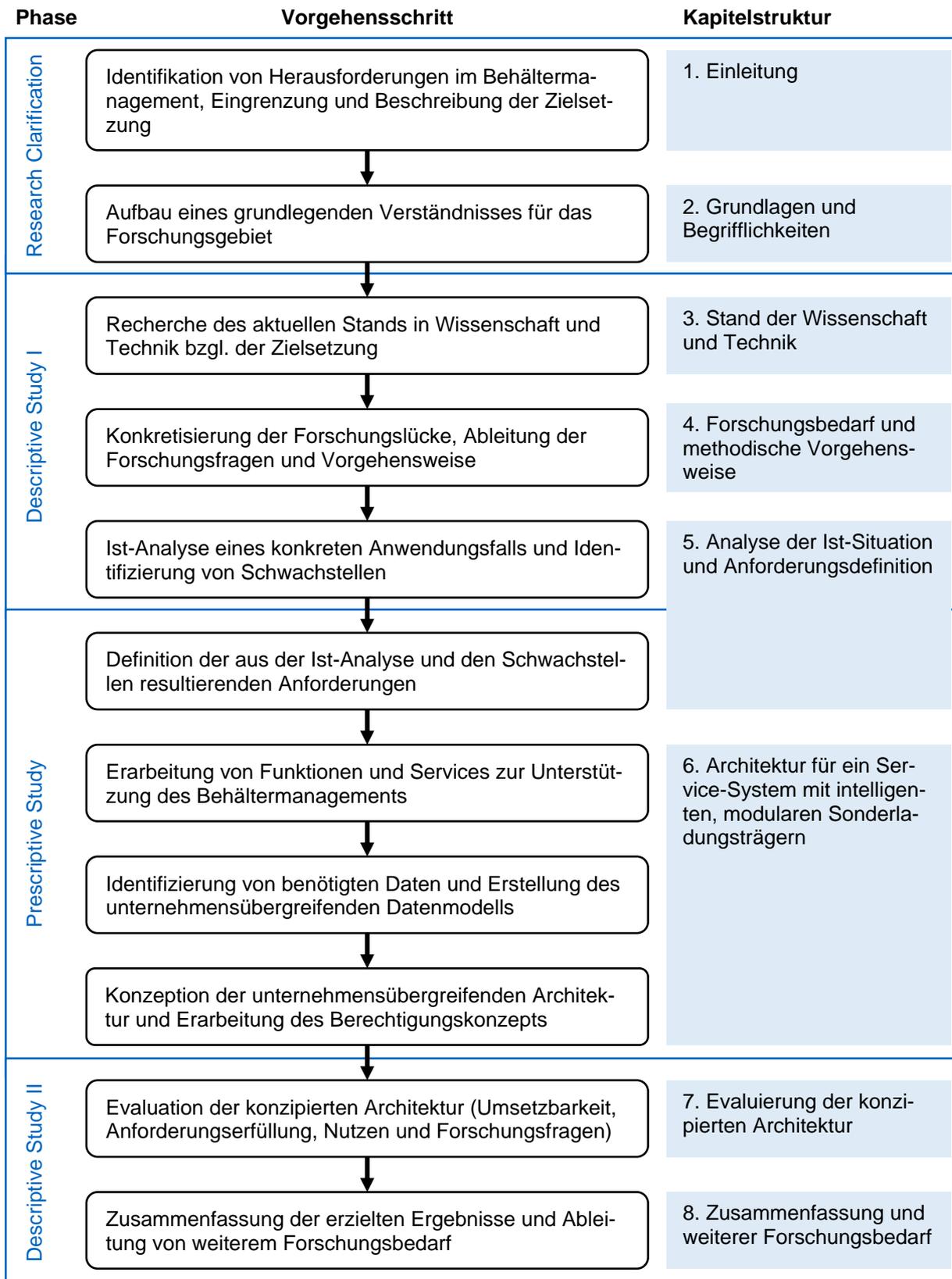


Abbildung 4-1: Wissenschaftliche, iterative Vorgehensweise und Zuordnung zur Kapitelstruktur

5 Analyse der Ist-Situation und Anforderungsdefinition

In diesem Kapitel werden die identifizierten Anforderungen an das unternehmensübergreifende Service-System mit intelligenten, modularen Sonderladungsträgern und die damit verbundene Architektur strukturiert hergeleitet und dargestellt. Dafür werden im Folgenden, nach einer Beschreibung des Vorgehens zur Anforderungsermittlung, der aufgenommene Ist-Prozess für ein Fallbeispiel eines Behälterkreislaufs für Sonderladungsträger aus der Automobilindustrie und die auf der Ist-Prozessanalyse basierenden Schwachstellen präsentiert (*Descriptive Study I*). Anschließend werden die resultierenden Anforderungen, der erste Teil der *Prescriptive Study*, aufgeführt.

5.1 Vorgehen zur Anforderungsidentifikation

Die methodische Vorgehensweise zur Anforderungsidentifikation (siehe Abbildung 5-1) gestaltete sich nach den Grundsätzen des Requirements-Engineering (vgl. [Par-1998, S. 27]), der strukturierten Ermittlung, Beschreibung und Analyse von Anforderungen. Dabei werden im ersten Schritt neben Experteninterviews mehrere Workshops mit den Teilnehmern eines Behälterkreislaufs durchgeführt, um den Ist-Prozess (u. a. über Prozesssteckbriefe) zu ermitteln. Bei den Teilnehmern der Workshops handelt es sich um Experten im Bereich Behältermanagement bei einem OEM, bei einem Automobilzulieferer und bei einem Behälterhersteller. Prozessbeobachtungen vor Ort dienen zur Detaillierung der aufgenommenen Prozesse der Behälterentwicklung, -herstellung und des Behältereinsatzes. Dabei gewährleistet der fallstudienbasierte Ansatz der Ist-Prozessaufnahme die Aktualität der aufgenommenen Prozesse und Herausforderungen.

Basierend auf der Ist-Prozessanalyse des Flussdiagramms, den Prozessbeobachtungen und den Zielen und Erfahrungen der Prozessbeteiligten werden, unter Berücksichtigung der sieben Verschwendungsarten (vgl. [Ōno-2013, S. 165]), die Schwachstellen des bestehenden Ist-Prozesses erfasst und strukturiert festgehalten. Diese ergänzen die mithilfe der Literaturrecherche ermittelten und in Abschnitt 1.1 bereits präsentierten aktuellen Herausforderungen des Behältermanagements. Für alle identifizierten Herausforderungen und Schwachstellen werden die zugrundeliegenden Ursachen mithilfe einer Ursache-Wirkungs-Analyse erarbeitet. Auf der Grundlage der ermittelten Ursachen werden die Anforderungen an den zukünftigen Prozess und das geplante Ser-

vice-System abgeleitet. Diese werden um weitere u. a. über Workshops und Fragebögen erfasste Anforderungen von Experten aus dem Bereich des Behältermanagements ergänzt. Parallel hierzu werden grundlegende Anforderungen sowie Gestaltungsprinzipien für Architekturen mithilfe der in Abschnitt 3.3 vorgestellten Referenzarchitekturen gesammelt. Die konsolidierten Anforderungen werden analysiert (u. a. hinsichtlich der Anforderungskonflikte) und iterativ überarbeitet. Die finalisierten Anforderungen werden mit den Experten nach der MoSCoW-Methode, einer vierstufigen Priorisierungsskala (vgl. [Hat-2007]), in die Kategorien „Muss“ (Must), „Soll“ (Sould), „Kann“ (Could) und „Nicht zu erfüllen“ (Won't) eingeordnet, um deren Relevanz abzusichern.

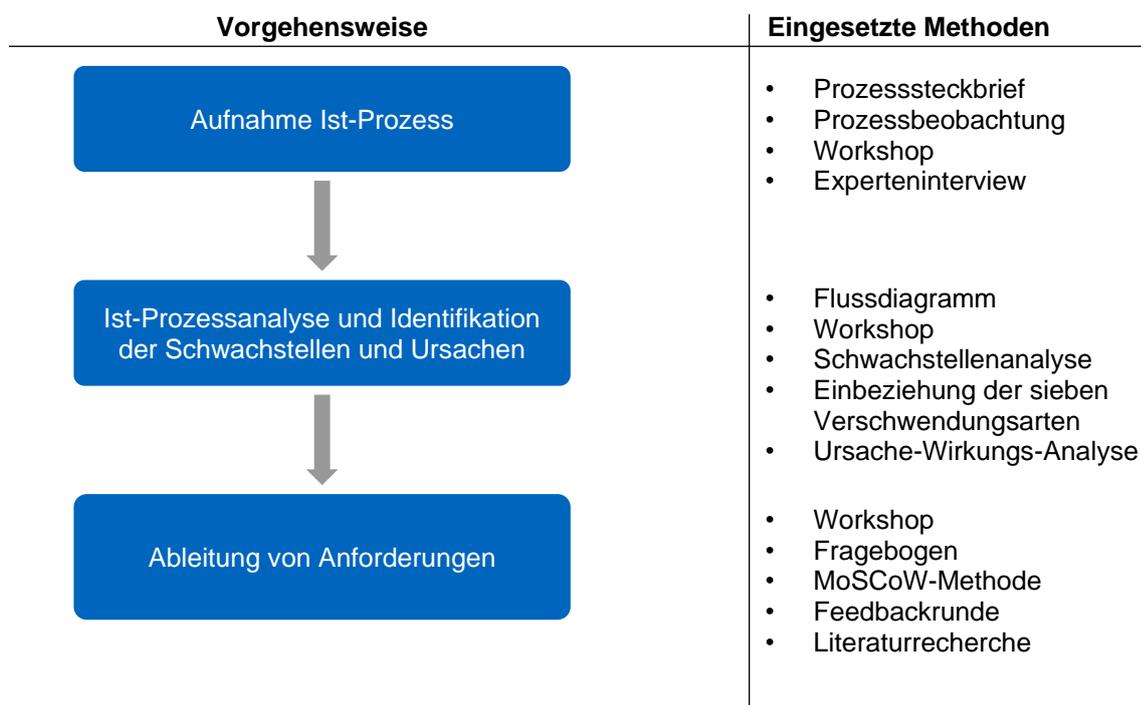


Abbildung 5-1: Vorgehen zur Anforderungsermittlung

5.2 Analyse der Ist-Prozesse im Behältermanagement

Im Weiteren werden die übergeordneten Prozesse im Zusammenhang mit dem Behältermanagement von Sonderladungsträgern in der Automobilbranche beschrieben (vgl. auch [Zei-2018]). Die aufgenommenen Ist-Prozesse teilen sich in die Behälterentwicklung, die Behälterherstellung, den Behältereinsatz und das Management des Behälterkreislaufs auf. Anschließend werden die Ergebnisse der detaillierten Prozess- und Schwachstellenanalyse vorgestellt.

Die **Behälterentwicklung** (siehe Abbildung 5-2, links), welche in der Regel Projektcharakter hat, wird vom OEM beauftragt, da dieser für die Entwicklung der zu trans-

portierenden Bauteile verantwortlich ist und für den Behälterkreislauf die Sonderladungsträger bereitstellt. Besonders herausfordernd ist, dass die Ladungsträgerentwicklung parallel zum Bauteilentwicklungsprozess stattfindet und so anfangs weder der Design-Freeze noch ein physisches Muster des zu transportierenden Bauteils vorhanden sind. Die Entwicklung startet von Seiten des Behälterherstellers mit der Aufnahme und Analyse der Anforderungen der eingebundenen Stakeholder (u. a. OEM, Logistikdienstleister und Zulieferer) an den Sonderladungsträger. Anschließend wird ein erstes Konzept des gewünschten Sonderladungsträgers erstellt. Dieses wird mit den Stakeholdern abgestimmt, bevor die detaillierte Konstruktion des Behälters erfolgt. Auch die Konstruktionszeichnung wird, meist in mehreren Abstimmungsrunden, diskutiert und iterativ angepasst.

Ist die Konstruktionszeichnung abgenommen, wird vom Behälterhersteller ein Prototyp erstellt. Mit diesem werden neben einer Sichtprüfung erste Transport-, Beladungs- und Entnahmeversuche mit allen Stakeholdern durchgeführt. In der Regel müssen auch hier einige iterative Schleifen durchlaufen und die Konstruktionszeichnungen entsprechend angepasst werden, bis der Prototyp von allen Stakeholdern abgenommen wird. Ist die Abnahme erfolgreich, übergibt der Behälterhersteller das erstellte CAD-Modell (Computer-Aided-Design-Modell), die technische Zeichnung und den Prototyp des Behälters an den OEM und schließt somit das Entwicklungsprojekt ab. Entlang des gesamten Entwicklungsprozesses finden Eingaben in verschiedenste IT-Systeme (u. a. Datenablage auf einem Server, ERP-System, CAD-Datenbank) statt. Diese sind untereinander meist nicht automatisch synchronisiert, wodurch es zu aufwendigen manuellen Synchronisationen bei iterativen Änderungsschleifen kommt.

Die Behälterentwicklung ist abgekoppelt von der **Behälterherstellung**, da beide an unterschiedliche Unternehmen vergeben werden können. Auch die Behälterherstellung (siehe Abbildung 5-2, rechts) von Sonderladungsträgern hat meist projektartigen Charakter, da es sich in der Regel um einen einmaligen Auftrag handelt. So werden im ersten Schritt die vom OEM an den Behälterhersteller übergebenen CAD-Daten, technische Zeichnungen und ggf. vorhandene Prototypen analysiert, Anforderungen der Stakeholder geklärt und der Lieferplan abgestimmt. Anschließend findet eine Fertigungsoptimierung der Konstruktion des Sonderladungsträgers statt, auf deren Basis Stücklisten und Arbeitspläne erstellt werden. Darauf aufbauend erfolgt die Kapazitäts-, Termin- und Materialbedarfsplanung durch den Behälterhersteller. Dieser ist bei der Materialbeschaffung selbst stark von den Lieferzeiten der Rohstoff- und Halbzeuglieferanten abhängig und muss mit Beschaffungszeiten von mehreren Wochen wie etwa bei Kunststoffteilen rechnen. Sind alle benötigten Materialien vorhanden, beginnt, je nach Auftrag, entweder die Vorserienproduktion oder die Serienproduktion. Wenn Behälterentwicklung und -herstellung nicht vom gleichen Unternehmen

durchgeführt werden, wird in der Regel vom OEM eine Vorserie in Auftrag gegeben. Dabei wird zunächst eine geringe Stückzahl an Vorserienbehältern produziert, die zur Freigabe an den Auftraggeber übergeben werden. Gibt dieser die Vorserienbehälter nach der Durchführung einer Sichtprüfung und erster Transport-, Beladungs- und Entnahmeversuche frei, kann die Serienproduktion beginnen. Anderenfalls kommt es zu iterativen Änderungsschleifen in der Fertigungsoptimierung, bis eine Freigabe durch den OEM erfolgt. Die Serienproduktion umfasst bei einem Sonderladungsträger aus

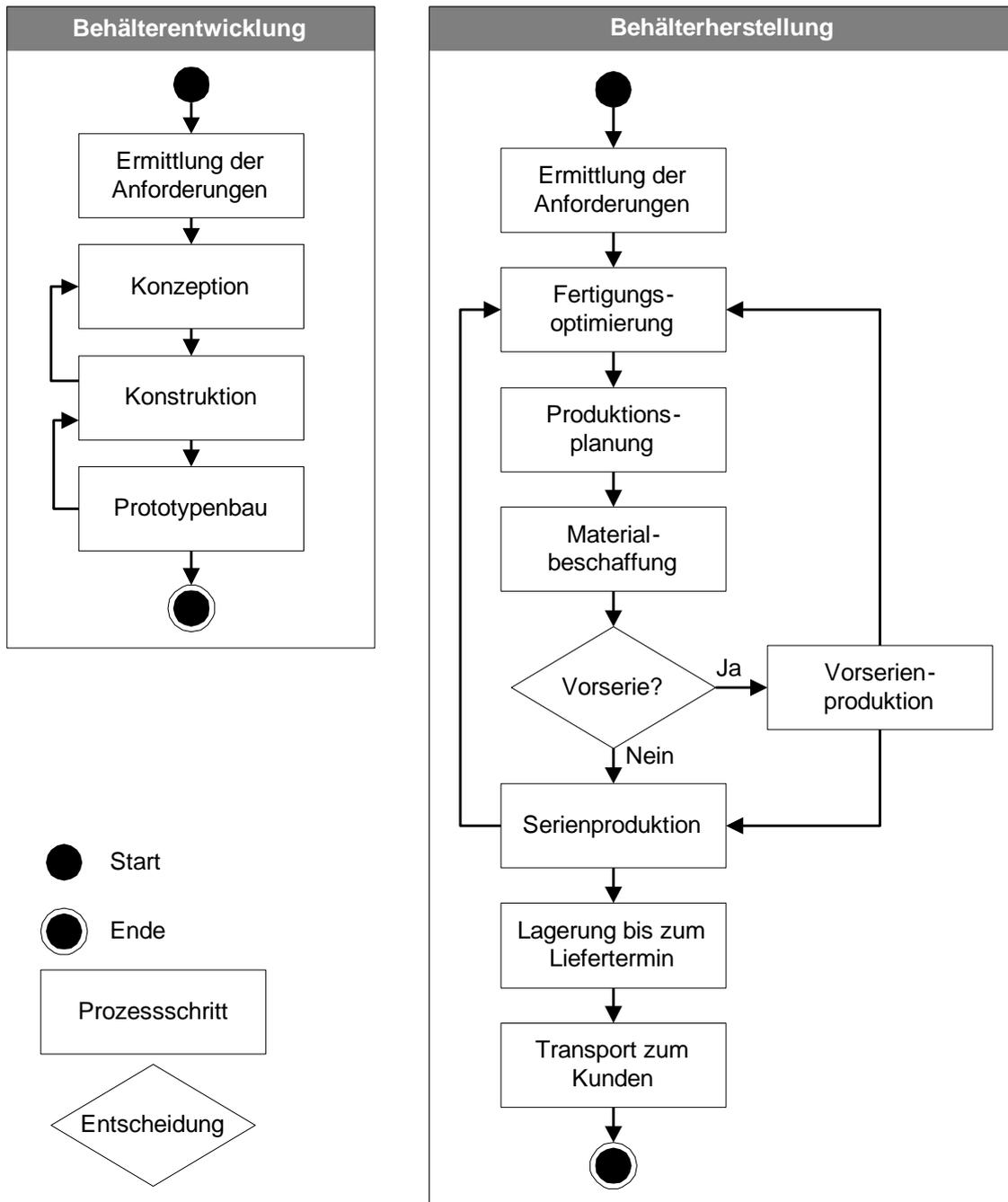


Abbildung 5-2: Ist-Prozess der Behälterentwicklung und -herstellung von klassischen Sonderladungsträgern in der Automobilindustrie

Stahl typischerweise vier Schritte: Rohmaterialzuschnitt, Schweißen des Außenbehälters, Montage des Innenlebens und eine Qualitätskontrolle. Dabei erfolgen die einzelnen Arbeitsschritte meist losgrößenweise.

In der Regel werden vom Auftraggeber sogenannte Serienausfallmuster beauftragt. Serienausfallmuster sind Sonderladungsträger, die bereits früh während der Serienproduktion der Behälter und vor dem offiziellen Liefertermin der gesamten Bestellung an den OEM übergeben werden. Mit diesen Serienausfallmustern werden beim OEM und seinen Lieferanten, vor dem Start der Serienproduktion beim OEM, Packversuche, Transportversuche und Handhabungsversuche in den Werken durchgeführt. Dies dient dazu, den Behälter in den jeweiligen Werken vorzustellen und vorab dessen Einsatz zu testen. Sollte an diesem Punkt noch Änderungsbedarf festgestellt werden, muss eine erneute iterative Änderungsschleife über die Fertigungsoptimierung durchlaufen werden und es müssen die bereits produzierten Sonderladungsträger entsprechend nachgearbeitet werden.

Die in Losgröße produzierten Behälter werden beim Behälterhersteller bis zum vereinbarten Liefertermin gelagert. Ist dieser erreicht, werden die Sonderladungsträger mit einem Lieferschein in Papierform versehen und mit einer Spedition verschickt. Bei Ankunft der Sonderladungsträger im Wareneingang beim OEM oder bei dessen Zulieferer, beginnt der reguläre Nutzungszyklus bzw. der reguläre Einsatz der neuen Behälter im Behälterkreislauf. Auch bei der Behälterherstellung finden verschiedenste Eingaben (z. B. Lieferstatus Rohmaterial, Produktionsstatus, technische Zeichnungen oder Arbeitspläne) in nicht synchronisierte IT-Systeme statt. Um Unstimmigkeiten bei in verschiedenen IT-Systemen doppelt abgelegten Datensätzen zu vermeiden, kommt es bei Änderung von Eingaben zu einem hohen Mehraufwand. Auch steigert sich der Aufwand durch Anfragen des Auftraggebers nach dem Produktionsstatus der bestellten Sonderladungsträger. Der Status muss in der Regel manuell ermittelt werden, u. a. durch Zählen der produzierten Behälter, um die meist telefonisch und in unregelmäßigen Abständen auftretenden Anfragen des OEM zu beantworten.

Der Prozessablauf des **Behältereinsatzes** innerhalb eines geschlossenen Kreislaufs für Sonderladungsträger ist in Abbildung 5-3 dargestellt. Er beginnt mit dem Wareneingang der leeren Sonderladungsträger beim Zulieferer. Diese werden dort einer Identitäts-, Mengen- und Qualitätsprüfung unterzogen. Bei der Mengenprüfung wird die tatsächliche Liefermenge mit dem Lieferschein abgeglichen und es werden auftretende Differenzen vermerkt. Die Mengenprüfung dient als Grundlage zur Durchführung der Wareneingangsbuchung. Dabei wird die Anzahl der Behälter, die sich im Behälterkreislauf befinden, im Behältermanagementsystem jeweils den Konten der Zulieferer

oder des OEM zugeordnet. Dies dient dem Überblick über aktuelle Behälterbewegungen und -bestände zwischen dem OEM und den Zulieferern. Mithilfe einer Sichtprüfung wird bewertet, ob die Behälter den internen Qualitätsstandards genügen. Sind die Behälter etwa verschmutzt oder beschädigt, werden diese gesperrt und in ein Sperrgutlager gebracht. Dort werden sie von einem externen Dienstleister abgeholt und je nach Zustand des Sonderladungsträgers gereinigt, gewartet, instandgesetzt oder bei irreparablen Schäden oder unwirtschaftlichen Reparaturen entsorgt. Dabei werden die Maßnahmen aufgrund von getroffenen Rahmenverträgen zu Entsorgungen, Reparaturen, Wartungen und Reinigungen nur sporadisch dokumentiert und sind im Nachgang den einzelnen Behältern nicht mehr zuordenbar.

Sind die Arbeiten an den Sonderladungsträgern durchgeführt, werden die aufbereiteten Behälter wieder zum Wareneingang des Zulieferers transportiert. Dort werden sie nach erneuter Mengen- und Qualitätsprüfung mit den anderen Sonderladungsträgern ins Leergutlager gebracht. Werden in der Behälterbestückung Ladungsträger benötigt, erfolgt deren Transport vom Leergutlager zur Bereitstellung am Bestückungsarbeitsplatz. Dabei werden die Sonderladungsträger bei Bedarf nochmals durch einen internen Mitarbeiter grob gereinigt. Nach der Bestückung der Behälter wird das Vollgut zum Warenausgang gebracht und es wird die Warenausgangsbuchung durchgeführt. Im Anschluss daran wird das Vollgut mit den passenden Lieferpapieren für den Weitertransport zum OEM in den LKW verladen.

Basierend auf wiederkehrenden Abstimmungen zwischen Zulieferer und OEM wird ein Anlieferzeitfenster festgelegt und der Transport durch eine Spedition durchgeführt. Nach der Entladung des Vollguts im Wareneingang des OEM wird neben einer Prüfung der Lieferpapiere eine stichprobenartige Qualitäts- und Mengenprüfung der gelieferten Bauteile durchgeführt. Die im Anschluss durchzuführende Verbuchung der Behälter im Behältermanagementsystem erfolgt dabei meist gesammelt am Ende des Tages. Nach der Qualitäts- und Mengenprüfung werden die Sonderladungsträger auf eine Lagerfläche gebracht. Dort verbleiben sie, bis die geladenen Bauteile von der Produktion abgerufen werden. Ist dies der Fall, findet der interne Transport zur Bereitstellfläche am Arbeitsplatz statt, an der die Entnahme der Bauteile erfolgt. Ist der Behälter leer, wird dieser in das Leergutlager des OEM gebracht und dort bis zum Leergutabruf durch den Zulieferer gelagert. Benötigt der Zulieferer leere Sonderladungsträger, meldet er seinen Bedarf (u. a. über ein gemeinsames IT-System oder via E-Mail) dem OEM. Dieser entnimmt die gewünschte Anzahl von Behältern aus seinem Leergutlager und bringt sie in den Warenausgang. Dort werden die bestellten Ladungsträger in den LKW verladen, die Buchung im Behältermanagementsystem durchgeführt, Lieferpapiere erstellt und die Ladungsträger durch eine Spedition zum Wareneingang des Zulieferers

transportiert. In der Regel ist der Sonderladungsträger mit einem Begleitschein in Papierform und einem passenden Barcode ausgestattet. Diese werden zum Teil innerhalb des Behälterkreislaufts verwendet, um die werksinternen Material- und Behälterbewegungen durch manuelles Scannen des Barcodes (z. B. bei der Bestückung des Behälters) zu erfassen.

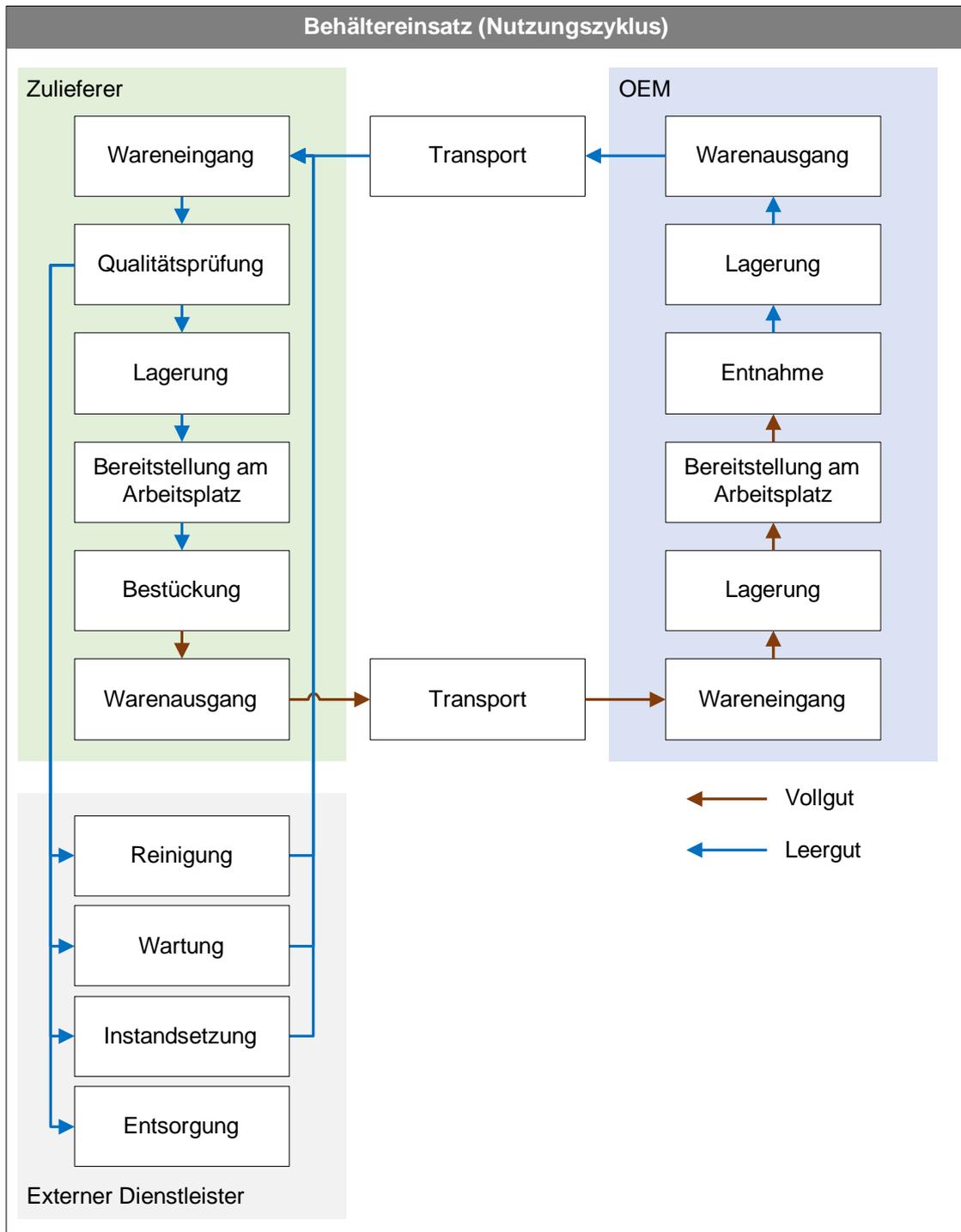


Abbildung 5-3: Vereinfachter Ist-Prozess des Behältereinsatzes von klassischen Sonderladungsträgern in der Automobilindustrie

Aufbauend auf dem physischen Behälterfluss führt das Behältermanagement ein kontinuierliches Bestands-Monitoring und -controlling der Sonderladungsträger innerhalb des Behälterkreislaufs durch. Hierzu zählen manuelle Buchungen von Behälterbewegungen auf Unternehmenskontenebene im Behältermanagementsystem, der tägliche Zählvorgang von Behältern vor Ort und der meist monatlich durchgeführte Abgleich mit den Behälterbuchungen des Lieferanten. Basierend auf diesen Daten muss das Behältermanagement u. a. Behälterschwund, -engpässe oder Qualitätsprobleme erkennen und darauf mit angemessenen Maßnahmen, wie Nachbestellungen, Sondertransporten oder Einwegverpackungen, reagieren. Auch Über- oder Unterbestände werden durch das Behältermanagement des OEM manuell ausgeglichen, um so die benötigte Lagerfläche zu reduzieren oder Engpässen vorzubeugen. Ebenso gehören die Klärung und Bearbeitung von aufgetretenen Falschlieferungen in das Aufgabenfeld des Behältermanagements.

In der Regel verändern sich mit dem Modellwechsel in der Automobilproduktion (alle vier bis sechs Jahre) auch die zugehörigen Bauteile, Bereitstellungs- und Montageprozesse. Gegen Ende des Nutzungszyklus der Sonderladungsträger, also gegen Ende der Produktion der jeweiligen Fahrzeugserie, wird unternehmensintern geprüft, ob die Behälter für die nachfolgenden Fahrzeugreihen direkt oder mit geringfügigen Umbaumaßnahmen wiederverwendet werden können. Dies ist meist aufgrund der Fertigungsverfahren und speziellen Konstruktion der Sonderladungsträger oder des mit dem Wiedereinsatz verbundenen Reparaturaufwands aus wirtschaftlichen Gründen nicht möglich. Deshalb werden die Sonderladungsträger nach Ende des Nutzungszyklus in der Regel entsorgt.

Abgeleitet aus den beschriebenen Ist-Prozessen des Fallbeispiels und den aus der Literatur in Abschnitt 1.1 identifizierten Herausforderungen sind die für diese Arbeit relevanten Schwachstellen mit ihrer Wirkung auf den Behälterkreislauf in Tabelle 5-1 zusammengefasst. In der tabellarischen Darstellung werden außerdem die mit einer Ursache-Wirkungs-Analyse identifizierten Ursachen entsprechend zugeordnet. Aufbauend auf den identifizierten Ursachen werden im folgenden Abschnitt Anforderungen an das zu entwickelnde System definiert, um so die Schwachstellen zu beheben.

Tabelle 5-1: Zusammenfassung der Herausforderungen und Schwachstellen, Aufgliederung in Wirkung und mögliche Ursachen

Nr.	Wirkung auf den Behälterkreislauf	Ursachen
S01	Vielzahl von langatmigen Abstimmungs- und Abnahmeprozessen bei der Entwicklung und Herstellung	viele Stakeholder mit unterschiedlichsten Anforderungen involviert
S02	häufige Änderungsschleifen und späte Änderungen bei der Entwicklung	später Design Freeze des zu transportierenden Bauteils
S03	lange Dokumentationswege bei Änderungsschleifen und Doppelablagen bei der Entwicklung und Herstellung	nicht synchronisierte, teils proprietäre IT-Systeme
S04	fehlende Transparenz in den Prozessen der Entwicklung und Herstellung (kein aktueller Status einsehbar, oft telefonische Klärung notwendig)	
S05	fehlerhafte Behälterbuchungen im Behältermanagementsystem	manuelle Buchungsvorgänge (Mengen- oder Typenfehler möglich)
S06	keine aktuellen Zahlen zu Behälterbeständen	intransparente Behälterbewegungen: <ul style="list-style-type: none"> • nur wenige manuelle Erfassungsprozesse während des Kreislaufs • nicht synchronisierte, teils proprietäre IT-Systeme
S07	abweichende Ladungsträgerbestände (Buchungen im System vs. physisch vorhanden)	
S08	unerwartetes Aufkommen von Unter- oder Überbeständen	
S09	manuelle Auswertungen der Behälterbestände basierend auf unsicherer Datenlage: schlechte Entscheidungsbasis für benötigte Maßnahmen	
S10	beschädigte oder verunreinigte Bauteile oder Ladungsträger	unpassende Lagerbedingungen oder unsachgemäße Behälterhandhabung
S11	Ladungsträgerschwund	nicht dokumentierte Zweckentfremdung oder Entsorgung
S12	kaum Daten zum Ausmaß von Reinigungs- und Instandhaltungsvorgängen: keine Reaktion bei sich abzeichnender Regelmäßigkeit möglich	nicht dokumentierte Reinigungs- und Instandhaltungsmaßnahmen
S13	Falschlieferungen	Abhandenkommen des Lieferscheins, Verladungsfehler
S14	fehlende Wieder- und Weiterverwendung nach Ende eines Nutzungszyklus	fallspezifische Konstruktion und Bauweise der Sonderladungsträger

5.3 Identifizierte Anforderungen an die Architektur des Service-Systems

Die im vorhergehenden Abschnitt identifizierten Schwachstellen und Herausforderungen sollen durch das unternehmensübergreifende Service-System mit intelligenten, modularen Sonderladungsträgern und der damit verbundenen Architektur beseitigt werden. Basierend auf den mithilfe des Fallbeispiels und der Literaturrecherche ermittelten Ursachen, werden Anforderungen an das Service-System und die Architektur definiert. Dabei dienen die in Abschnitt 3.3 beschriebenen Referenzarchitekturen und mehrere Workshops mit Experten aus dem Bereich des Behältermanagements als Grundlage zur Identifikation von weiteren Anforderungen an die Architekturgestaltung.

Im Folgenden werden die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Anforderungen vorgestellt. Diese zielen darauf ab, den identifizierten Schwachstellen und beschriebenen Herausforderungen zu begegnen sowie die Effizienz und die Transparenz der aktuellen Prozesse im Behältermanagement zu erhöhen. Die ermittelten Anforderungen werden in Form einer Anforderungsliste (siehe Tabelle 5-2) beschrieben und nach der MoSCoW-Methode kategorisiert. Dabei werden die jeweiligen Anforderungen in der Tabelle in funktionale und nichtfunktionale Anforderungen unterteilt. Ihnen werden die adressierten Schwachstellen zugeordnet. Funktionale Anforderungen beschreiben gewünschte Funktionalitäten des Service-Systems („was ist gefordert“), wohingegen nichtfunktionale Anforderungen die Art oder Qualität der geforderten Funktionalität beschreiben („wie soll die Funktionalität umgesetzt werden“) (vgl. [Par-1998, S. 23]).

Tabelle 5-2: *Beschreibung der identifizierten Anforderungen an die Architektur des unternehmensübergreifenden Service-Systems*

Nr.	Anforderung	Funktional, nichtfunktional	Schwachstelle
A01	Der Einsatz eines modularen Sonderladungsträgers mit wiederverwendbaren Modulen muss realisiert werden.	funktional	S01; S02; S14;
A02	Ein Pooling von modularen Sonderladungsträgern und deren standardisierten Modulen muss zur Verfügung gestellt werden (u. a. zur Steigerung der Verfügbarkeit oder für die Rückgabe von modularen Sonderladungsträgern).	funktional	S01; S02; S14;
A03	Eine Möglichkeit zur webbasierten Konfiguration eines modularen Sonderladungsträgers und Angaben zur Verfügbarkeit der einzelnen Module müssen gegeben sein.	funktional	S01; S02; S03; S04;

Nr.	Anforderung	Funktional, nichtfunktional	Schwach- stelle
A04	Der aktuelle Auftragsstatus der Behälterherstellung muss jederzeit einsehbar sein.	funktional	S03; S04;
A05	Eine digital nachvollziehbare Rekonfiguration (Umbau) der modularen Sonderladungsträger muss ermöglicht werden.	funktional	S03; S04; S14;
A06	Die Möglichkeit zur digitalen Dokumentation eines Schadensberichts für einen modularen Sonderladungsträger muss gegeben sein.	funktional	S10; S11;
A07	Digital nachvollziehbare Wartungsvorgänge (physische Wartung und digitale Informationen zur Wartung) müssen realisiert werden.	funktional	S12;
A08	Ein digital nachvollziehbarer Reparaturvorgang (physische Reparatur und digitale Informationen zur Reparatur) muss gewährleistet sein.	funktional	S12;
A09	Digital nachvollziehbare Reinigungsvorgänge (physische Reinigung und digitale Informationen zur Reinigung) sollen ermöglicht werden.	funktional	S12;
A10	Ein digital nachvollziehbares Recycling (physisches Recycling und Informationen wie bspw. die CO ₂ -Bilanz) der Module muss vorgesehen werden.	funktional	S14;
A11	Die aktuellen Positionen der modularen Sonderladungsträger im Behälterkreislauf müssen jederzeit zur Verfügung stehen (Tracking).	funktional	S06; S07; S08; S09; S11; S13;
A12	Ein historischer Verlauf der Positionsdaten der modularen Sonderladungsträger muss ermittelt werden können (Tracing).	funktional	S06; S07; S08; S09; S11; S13;
A13	Eine automatisierte Buchung von Behälterbewegungen innerhalb des Behälterkreislaufs muss ermöglicht werden.	funktional	S05; S07; S08; S09; S11; S13;
A14	Eine Überwachung der Zustände (Füllstand, Temperatur, Erschütterung, Neigung und Luftfeuchtigkeit) soll für den modularen Sonderladungsträger realisiert werden.	funktional	S10;

Nr.	Anforderung	Funktional, nichtfunktional	Schwach- stelle
A15	Alle Daten entlang des Lebenszyklus eines modularen Sonderladungsträgers oder eines Moduls müssen (für spätere Auswertungen) erfasst und gespeichert werden.	funktional	S09; S12;
A16	Ein automatischer Soll-Ist-Vergleich von Daten, die für das Behältermanagement relevant sind (u. a. Bestände, Standzeiten), und die Überwachung von Grenzwerten müssen möglich sein (inkl. einer aktiven Benachrichtigung des Anwenders bei Abweichungen).	funktional	S08; S09; S10;
A17	Die Module und der modulare Sonderladungsträger selbst müssen eindeutig identifizierbar sein.	nichtfunktional	
A18	Datenpakete müssen von der IoT-Technologie am Ladungsträger bis zum Anwender sowohl intervall- als auch ereignisbasiert übertragen werden können.	nichtfunktional	
A19	Es muss die Möglichkeit bestehen sowohl Echtzeitdaten ²⁰ als auch historische Daten verarbeiten zu können.	nichtfunktional	
A20	Funktionalitäten zur Speicherung, Verarbeitung und Auswertung von gesammelten Daten rund um den Behälter müssen vorhanden sein.	nichtfunktional	
A21	Eine plattformunabhängige Visualisierung und Exportfunktion der generierten Daten und Auswertungen müssen gewährleistet sein.	nichtfunktional	
A22	Es müssen Schnittstellen zur Kommunikation mit anderen Anwendungen (u. a. ERP-Systeme) berücksichtigt werden.	nichtfunktional	
A23	Standards und Normen sollen verwendet werden, um den unternehmensübergreifenden Einsatz des Service-Systems zu vereinfachen.	nichtfunktional	
A24	Eine Veränderung der Anzahl von Teilnehmern (modulare Sonderladungsträger, sonstige Datenquellen und Anwender) im Service-System muss jederzeit möglich sein (Skalierbarkeit).	nichtfunktional	

²⁰ Echtzeit: Verarbeitung von Daten durch einen Computer gemäß den von einem externen Prozess auferlegten Zeitanforderungen [ISO-2382].

Nr.	Anforderung	Funktional, nichtfunktional	Schwach- stelle
A25	Eine Erweiterung um zusätzliche Funktionalitäten und Datenquellen, bspw. um andere Ladungsträgertypen, muss gewährleistet sein (Erweiterbarkeit).	nichtfunktional	
A26	Ein Berechtigungskonzept muss den Datenzugriff regulieren.	nichtfunktional	
A27	Ein durchgängiges Sicherheitskonzept (Safety und Security) muss integriert werden.	nichtfunktional	

6 Architektur für ein Service-System mit intelligenten, modularen Sonderladungsträgern

Kapitel 6 beschreibt den Hauptteil der *Prescriptive Study* dieser Arbeit, welche die Konzeptentwicklung einer Architektur für ein Service-System mit intelligenten, modularen Sonderladungsträgern beinhaltet. Die Architektur soll die Potenziale von intelligenten, modularen Sonderladungsträgern erschließen und diese für Unternehmen nutzbar machen. Zu Beginn wird das Vorgehen zur Erstellung der Architektur präsentiert. Anschließend werden die erarbeiteten Ergebnisse, konkret die Services, das zugehörige Funktionsmodell und deren Kategorisierung nach zu erzielendem Nutzen, dargestellt. Darauf aufbauend werden das konzeptionelle Datenmodell des Service-Systems, der Aufbau der konzipierten Fünf-Schichten-IoT-Architektur und das darin verankerte Berechtigungskonzept beschrieben. Kapitel 6 endet mit einer zusammenfassenden Beschreibung eines beispielhaften Serviceablaufs innerhalb der Architektur und einem Fazit.

6.1 Vorgehensweise zur Erstellung des Architekturkonzepts

Wie bereits in Unterabschnitt 2.2.2 dargestellt, strukturiert die Architektur die für das Service-System benötigten Funktionalitäten und Daten, um die gewünschten Anforderungen zu erfüllen. Darüber hinaus legt die Architektur die Struktur und das Zusammenwirken der Bausteine und die benötigten Schnittstellen fest. Dabei werden die für den Einsatz des Service-Systems benötigten Hard- und Softwarekomponenten (Ressourcen) innerhalb der Architektur strukturiert und genauer beschrieben.

Für die Konzeption der Architektur des Service-Systems mit intelligenten, modularen Sonderladungsträgern wird das in Abbildung 6-1 präsentierte Vorgehen angewandt. Die in Abschnitt 3.3 vorgestellten Referenzarchitekturen dienen als Leitfaden bei der Aufstellung der Vorgehensweise. Zuerst wird eine Funktionsmodellierung durchgeführt. Dabei werden die zur Erfüllung der identifizierten Anforderungen (Abschnitt 5.3) benötigten Funktionen lösungsneutral formuliert und es wird ein Funktionsmodell aufgestellt. Auf dieser Grundlage wird eine Funktionsanalyse (u. a. hinsichtlich Zielkonflikten und Widersprüchen) durchgeführt und die einzelnen Funktionen werden zu übergeordneten Services zusammengefasst. Die entstandenen Services, welche Teil eines unternehmensübergreifenden Service-Systems sind, werden in Workshops mit Experten im Bereich Behältermanagement evaluiert, um deren sinnhafte Gestaltung und Praxisrelevanz abzusichern.

Anschließend werden die für den Einsatz der konzipierten Funktionen und Services benötigten Daten und deren Relationen erarbeitet (u. a. mithilfe der Entity-Relationship-Modellierung, ERM, vgl. [Krc-2015, S. 71]). Diese werden als konzeptionelles Datenmodell (systemunabhängige Beschreibung der Datenstruktur, vgl. [Jar-2016, S. 24ff.]) dargestellt, welches die Daten des Service-Systems klassifiziert, strukturiert und deren Relationen abbildet. Als grafische Modellierungssprache wird die Unified Modeling Language (UML) ausgewählt. Konkret wird das UML-Klassendiagramm (vgl. [Hit-2005, S. 52ff.]) als objektorientierte Modellierung für die Darstellung des konzeptionellen Datenmodells verwendet, da dieses die Erstellung der Architektur und die Erarbeitung des Berechtigungskonzepts erleichtert. Das konzeptionelle Datenmodell wird durch Experteninterviews (u. a. mit Cloud-Experten von Microsoft, vgl. [Mor-2018]) bewertet, um dessen Plausibilität abzusichern. Aufbauend auf dem Funktionsmodell und konzeptionellen Datenmodell werden die zugehörigen Kommunikationsabläufe gestaltet. Das unternehmensübergreifende Berechtigungskonzept für das Service-System wird unter Einbezug der bisherigen Ergebnisse und einer Literaturrecherche erarbeitet.

Auf Grundlage der erzielten Ergebnisse werden die benötigten Ressourcen, sowohl Hardware-, Software- als auch der Personalbedarf, für den Einsatz der Services innerhalb des unternehmensübergreifenden Service-Systems erarbeitet. Als Ausgangspunkt dient hier eine strukturierte Literaturrecherche. Die identifizierten Ressourcen und zugehörigen Informationsflüsse werden mithilfe einer Systemarchitektur strukturiert dargestellt, um diese mit den Experten diskutieren und iterativ anpassen zu können. Basierend auf dem Funktionsmodell, dem konzeptionellen Datenmodell, dem Berechtigungskonzept und der Systemarchitektur wird eine fünfschichtige IoT-Architektur erstellt. Die sogenannte Fünf-Schichten-IoT-Architektur vereint die erarbeiteten Ergebnisse, definiert die grundlegenden Strukturen des Service-Systems und stellt die Komponenten, deren Beziehungen und Eigenschaften dar. Dementsprechend beschreibt die Fünf-Schichten-IoT-Architektur das unternehmensübergreifende Service-System mit intelligenten, modularen Sonderladungsträgern auf einer abstrakteren Ebene. Dabei orientiert sich der Aufbau der Architektur an den in Abschnitt 3.3 vorgestellten Referenzarchitekturen.

Die einzelnen Schritte der präsentierten Vorgehensweise werden iterativ wiederholt, sind aber der Einfachheit halber in Abbildung 6-1 als linearer Ablauf dargestellt.

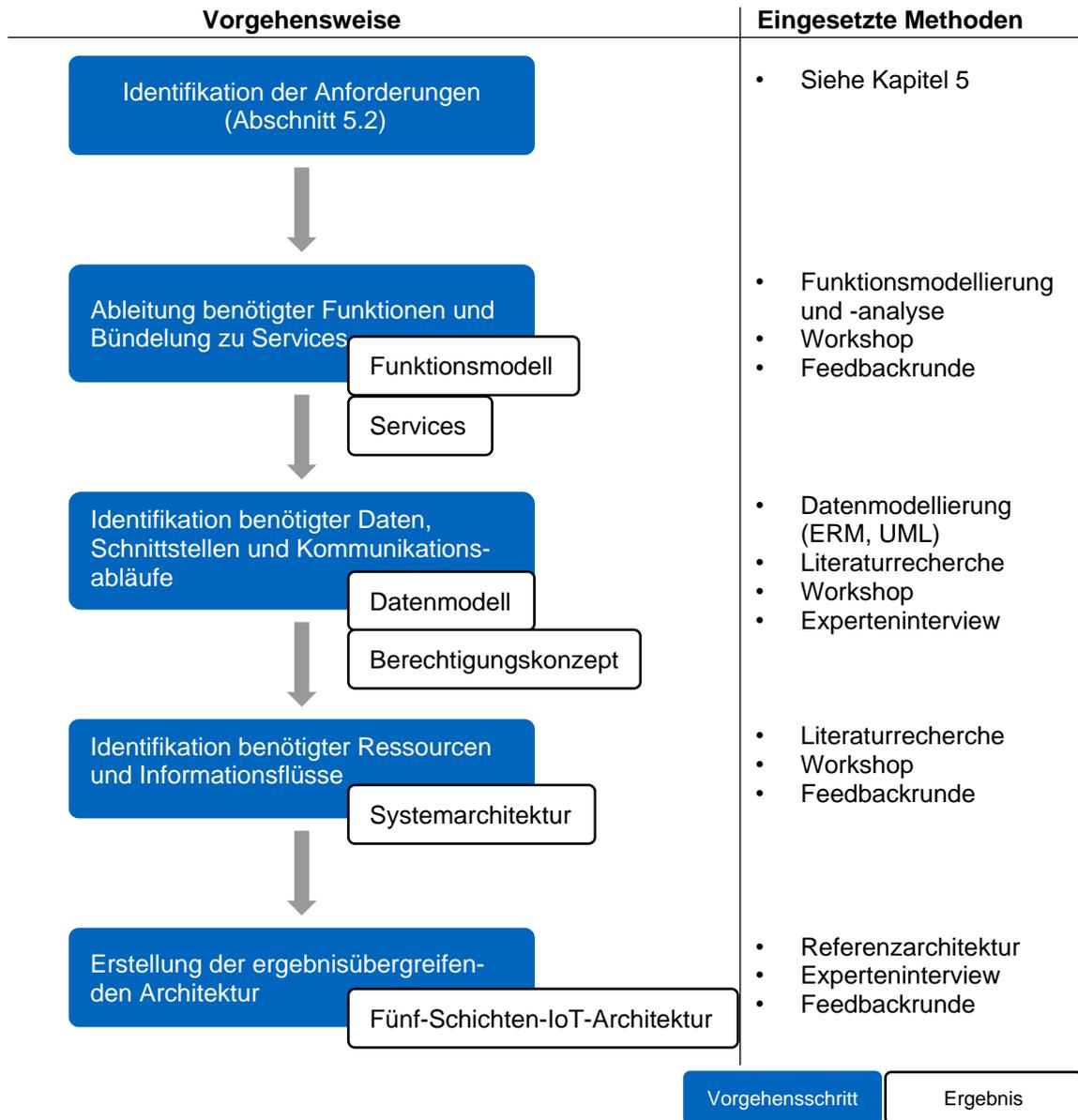


Abbildung 6-1: Vorgehensweise und eingesetzte Methoden zur Erstellung der Architektur für ein unternehmensübergreifendes Service-System

6.2 Konzipierte Services und Zuordnung zu Nutzenkategorien

In Unterabschnitt 6.2.1 werden die zur Erfüllung der Anforderungen erarbeiteten Services und deren Funktionsumfänge dargestellt. Basierend auf den Funktionsumfängen werden die übergeordneten Nutzenkategorien aufgestellt und die einzelnen Services den Kategorien zugeordnet (Unterabschnitt 6.2.2).

Aus den identifizierten Anforderungen (siehe Abschnitt 5.3) kann abgeleitet werden, dass der Einsatz eines intelligenten, modularen Sonderladungsträgers (Definition, vgl.

Kapitel 4) gefordert ist. So muss der Sonderladungsträger aus standardisierten, wiederverwendbaren Modulen aufgebaut (u. a. Anforderung A01) und mit IuK-Technologie sowie Sensorik ausgestattet sein (u. a. Anforderung A11 und A14), um die eingangs gestellten Anforderungen erfüllen zu können. Dementsprechend beziehen sich die folgenden Beschreibungen der erarbeiteten Ergebnisse auf einen Behälterkreislauf mit intelligenten, modularen Sonderladungsträgern. Für den weiteren Verlauf der Arbeit werden die Abkürzungen *imSLT* bzw. *imSLTs* für den Begriff *intelligenter, modularer Sonderladungsträger* bzw. dessen Plural verwendet.

6.2.1 Serviceumfänge und Funktionsmodelle

In diesem Unterabschnitt werden die erarbeiteten Services mit ihren (Teil-)Funktionen hierarchisch strukturiert (vgl. [Krc-2015, S. 66ff.]) modelliert. Das detaillierte Funktionsmodell, die lösungsneutrale Darstellung der zur Erfüllung der Anforderungen benötigten Funktionen, ist mit der Unterstützung einer Studienarbeit (vgl. [fml-2018b]) entstanden. Da das Modell sehr umfangreich ist, werden nur die für die Erstellung der Architektur relevanten Teilumfänge auf einer höheren Hierarchieebene und die einzelnen übergeordneten Services an sich beschrieben. Abbildung 6-2 bietet einen Überblick über die zur Erfüllung der Anforderungen aufgestellten und in den anschließenden Absätzen genauer beschriebenen Services (vgl. hierzu auch [Zei-2018] und [Rom-2018]). Datenunterstützte physische Services sind physische Tätigkeiten (z. B. Reparaturen), welche um datenbasierte Funktionalitäten (z. B. ein digitaler Reparaturbericht) erweitert werden. Datenbasierte Services hingegen fokussieren die Datenerhebung sowie -auswertung und beinhalten keine physischen Tätigkeiten.

Datenunterstützte physische Services	
<ul style="list-style-type: none"> • Pooling-System (für imSLTs) • Rekonfiguration • Recycling 	<ul style="list-style-type: none"> • Wartung • Reparatur • Reinigung
Datenbasierte Services	
<ul style="list-style-type: none"> • imSLT-Konfigurator • Auftragsverfolgung (Herstellung) • digitaler Schadensbericht • aktuelle Positionen und Bestände 	<ul style="list-style-type: none"> • digitales Behältermanagement • automatisierte Buchung • Zustandsüberwachung • Lebenszyklusüberwachung

Abbildung 6-2: Services zur Erfüllung der Anforderungen

Im Folgenden wird vor allem auf die Untergliederung der Services in ihre Teilfunktionen eingegangen, um diese besser in die erstellte Fünf-Schichten-IoT-Architektur (siehe Abschnitt 6.4) einordnen zu können. Dabei werden die Funktionen in physische Tätigkeiten, Systemausgaben (u. a. Darstellungen), Systemoperationen sowie Benutzer-eingaben kategorisiert und entsprechend in den Abbildungen mit verschiedenen Far-

ben (siehe Abbildung 6-3) gekennzeichnet. Einige Funktionen sind mehreren Kategorien gleichzeitig zuordenbar, weshalb die farbliche Kennzeichnung dieser Funktionen die überwiegende Kategorie widerspiegelt.

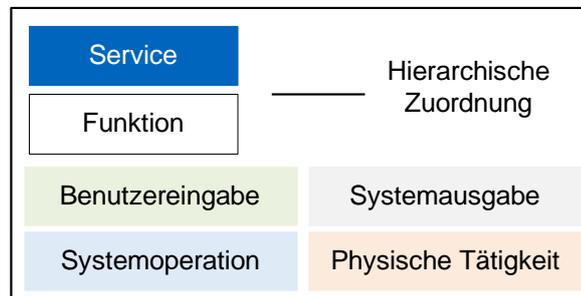


Abbildung 6-3: Legende der Funktionsmodellierung

Hervorzuheben ist, dass die konzipierten Services zu einem Service-System (vgl. Unterabschnitt 2.3.1) zusammengefasst werden, da unter den Services funktionale und datenbasierte Abhängigkeiten bestehen (siehe folgend und Abschnitt 6.3), die zur Leistungserbringung benötigt werden.

Service Pooling-System (für imSLT)

Der Service *Pooling-System* stellt dem Anwender aus standardisierten Modulen bestehende imSLTs aus einem Pool bereit, um eine Mengenflexibilität während dessen Nutzungszyklus zu gewährleisten (Funktionsmodell siehe Abbildung 6-4). Dabei wird der imSLT aus lagerhaltigen Modulen montiert. Aufgrund der Lagerhaltung der Module und Vorhaltung von Montagekapazitäten können bei Bedarf, während des Nutzungszyklus des jeweiligen imSLT-Typen, Ad-hoc-Lieferungen durchgeführt werden. Auch die flexible Rückgabe von imSLTs in den Pool wird durch diesen Service realisiert.

Um eine durchgängige Datenhaltung der Module über ihren Lebenszyklus zu gewährleisten, sind diese jeweils mit einer eindeutigen Identifikationsnummer (ID) ausgestattet. Die ID wird bei der Montage erfasst (bspw. durch den Scan eines QR-Codes) und mit der eindeutigen ID des imSLT verbunden. Somit lassen sich auch bei anderen Services, u. a. beim Service *Reparatur*, Informationen nicht nur dem imSLT, sondern auch den einzelnen Modulen direkt zuordnen. Beim Montagevorgang der imSLTs unterstützt die Erfassung der ID der einzelnen Module die Überprüfung der richtigen Montagereihenfolge (in Verbindung mit einer digitalen Montageanleitung) und ermöglicht eine automatische Anpassung der Lagerbestände für die montierten Module. Mit diesen Daten können u. a. auch Rückschlüsse auf die Lager- und Einsatzdauer einzelner Module und somit auf deren Eignung für einen weiteren Einsatz gezogen werden (Funktion: Daten des Pooling-Systems verwalten). Die am imSLT angebrachte ID des Ladungsträgers kann darüber hinaus während des Behälterkreislaufs

für weitere Services oder durch den Anwender für die Identifikation und Authentifizierung des Behälters genutzt werden.

Die zurückgegebenen imSLTs werden demontiert und die einzelnen Module werden einer Qualitätssicherungsprüfung (QS-Prüfung) unterzogen. Bei der Einlagerung selbst wird die ID der Module erfasst, um den Lagerbestand automatisch anzupassen. Besteht ein Modul die QS-Prüfung nicht, wird dieses recycelt (siehe *Service Recycling*).

Bzgl. der bereitzustellenden Funktionen überwiegen beim *Service Pooling-System* die physischen Tätigkeiten, die für den Betrieb des Pooling-Systems benötigt werden. Eine wichtige digitale Schnittstelle ist die durch eine Benutzereingabe durchgeführte Erfassung der ID der Module. Diese wird vor allem für die schlüssige Datenverwaltung des Pooling-Systems benötigt. Der Anbieter des *Service Pooling-System* wird im weiteren Verlauf der Arbeit als *Pooling-Betreiber* bezeichnet.

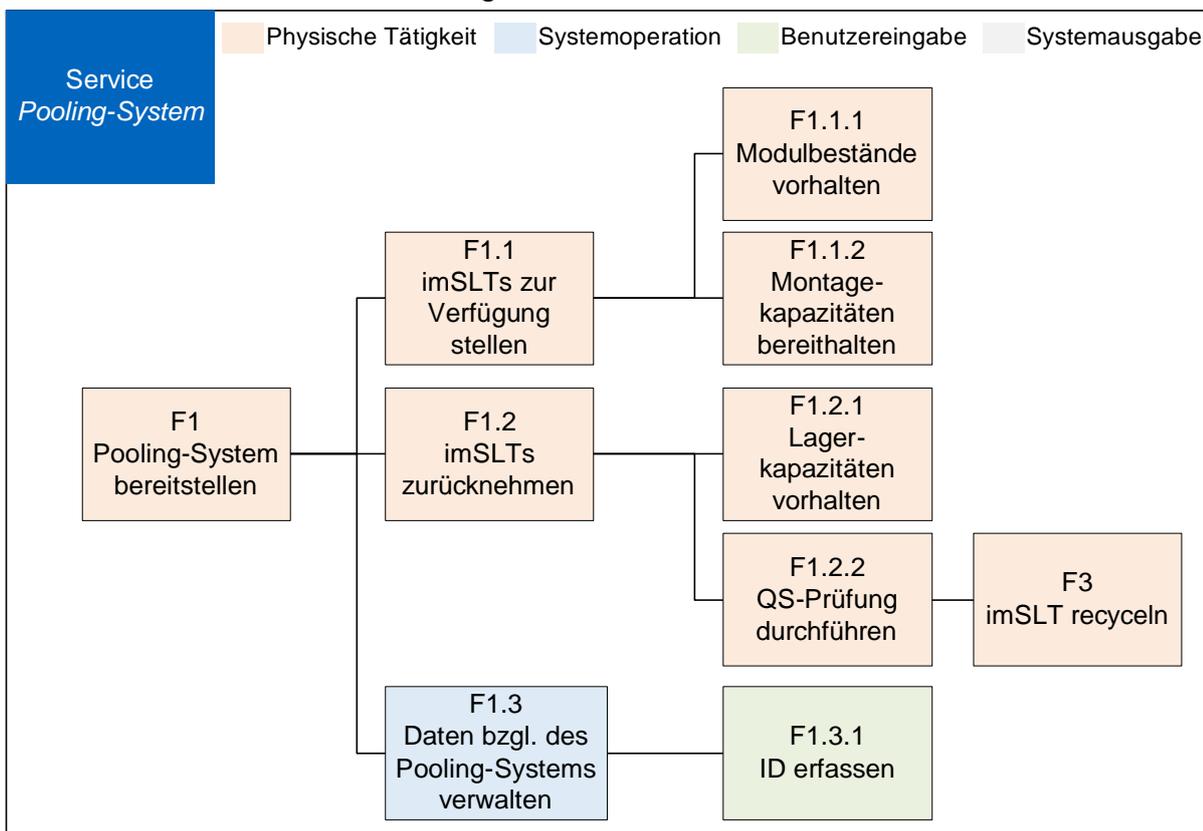


Abbildung 6-4: Funktionsmodell des Service Pooling-System für imSLTs

Service Rekonfiguration

Nach Ende des Nutzungszyklus eines imSLT-Typen, z. B. mit Ende einer Produktionsreihe, kommt der *Service Rekonfiguration* zum Einsatz (Funktionsmodell siehe Abbildung 6-5). Der Unterschied zum Pooling besteht darin, dass am Ende des Nutzungszyklus eines imSLT-Typs alle restlichen im Kreislauf vorhandenen Ladungsträger auf

einmal zurückgegeben werden. Dabei können diese bereits mit einem direkten Umbauftrag zu einem neuen imSLT-Typen deklariert sein. Prinzipiell bedient sich der Service *Rekonfiguration* aller Funktionalitäten des Service *Pooling-System*, um neue imSLTs für den Anwender bereitzustellen oder nicht benötigte Module einzulagern (z. B. F1.1 imSLT zur Verfügung stellen oder F1.2 imSLT zurücknehmen). Ein besonderes Augenmerk liegt hier auf der QS-Prüfung der Module der zurückgegebenen imSLTs, da diese entweder direkt wieder in die Montage eines neu beauftragten imSLT einfließen oder eingelagert werden. Werden neue Modultypen für den Umbauftrag benötigt oder ist die Anzahl der Module im Lager zu gering, werden diese anhand der Vorgaben durch den Service *imSLT-Konfigurator* (ein webbasierter Produktkonfigurator für imSLTs, siehe Service *imSLT-Konfigurator*) produziert. Auch die Datenverwaltung erfolgt analog zum Service *Pooling-System*. Im Gegensatz zur klassischen Entsorgung der Behälter am Ende des Nutzungszyklus kommt es durch den Service *Rekonfiguration* zu einer Wiederverwendung der Module.

Neben dem Umbau von Behältern kann der Service *Rekonfiguration* auch für eine initiale Konfiguration von imSLTs genutzt werden. Diese gestaltet sich analog zur beschriebenen Rekonfiguration und erlaubt die initiale Bereitstellung von imSLTs für den Behälterkreislauf ohne die Rückgabe eines Vorgängers. Dabei müssen allerdings eine größere Anzahl von Modulen aus dem Lager genutzt bzw. neu produziert werden, da keine imSLTs als Ausgangsbasis bereitstehen. Für das Gesamtsystem überwiegen vor allem die Vorteile der Rekonfiguration (im Gegensatz zur Konfiguration). Deshalb wird der Service *Rekonfiguration* genannt.

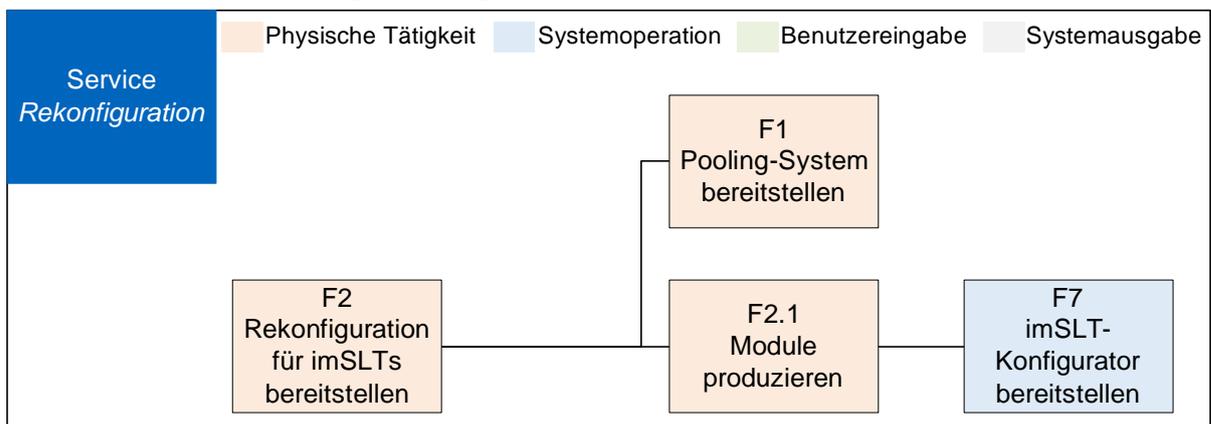


Abbildung 6-5: Darstellung des Service Rekonfiguration

Service Recycling

Ein Service, der eng in Verbindung mit dem Service *Pooling-System* steht, ist der Service *Recycling*. Dieser fasst die Funktionalitäten, die zu einem digital nachvollziehbaren Recycling benötigt werden, zusammen (siehe Abbildung 6-6). Zurückgegebene imSLTs werden innerhalb des Service *Pooling-System* einer QS-Prüfung unterzogen.

Bestehen sie diese nicht, wird die ID der Module erfasst und deren Recyclingprozess durchgeführt. Ein Recyclingbericht wird erstellt und der ID des jeweiligen Moduls im System zugeordnet. Innerhalb des Recyclingberichts werden die konkrete Art des Recyclings und weiterführende Kennzahlen, wie bspw. die CO₂-Bilanz des Recyclingvorgangs, dokumentiert. Somit kann überprüft werden, ob eine ökologische Entsorgung der defekten Module durchgeführt wurde. Durch die aufgenommenen Kennzahlen im Recyclingbericht lässt sich die Verbesserung der ökologischen Nachhaltigkeit quantifizieren.

Um diesen Service zu ermöglichen, sind vor allem Funktionalitäten zur Erfassung der ID und zur systemseitigen Zuordnung des Recyclingberichts relevant. Auch passende Funktionalitäten zur Ausgabe und zum Export dieser Daten müssen vorgesehen werden.

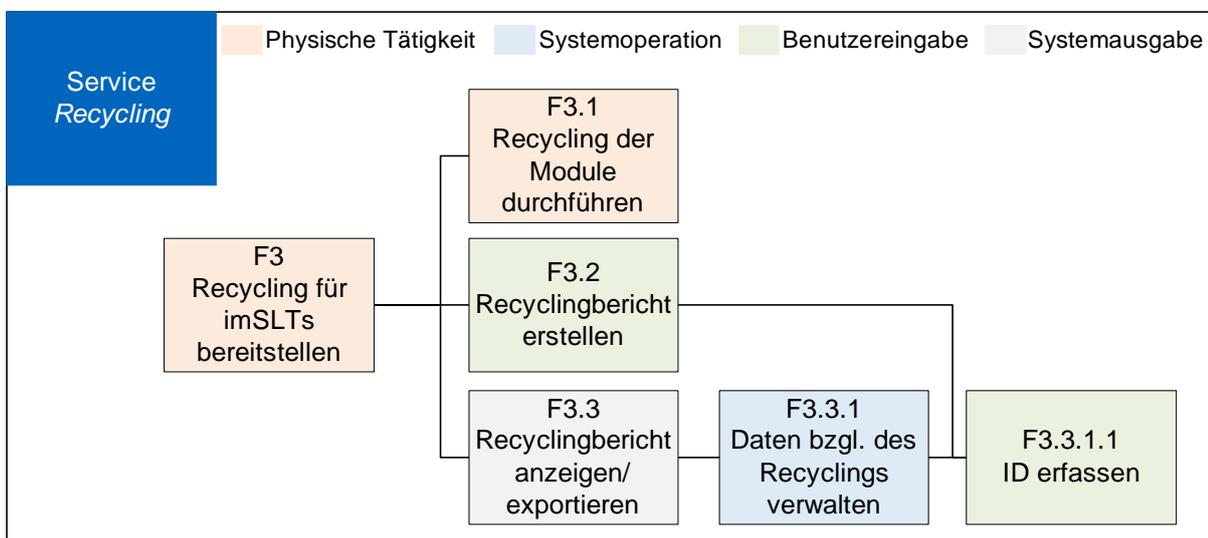


Abbildung 6-6: Funktionen des Service Recycling

Service Wartung

Der Service *Wartung* ergänzt die physische Durchführung der Wartung (z. B. das Ölen von Scharnieren) um datenbasierte Funktionalitäten (siehe Abbildung 6-7). Die im Rahmen des Service durchgeführten physischen Tätigkeiten sind dabei das Vorhalten von Verschleißteilen, die Wartungsarbeiten anhand eines Wartungsplans und die dabei inbegriffene QS-Prüfung. Die Wartung und frühzeitige Beseitigung von leichten Schäden können langfristig schwerwiegende Schäden am imSLT verhindern und die Lebensdauer der einzelnen Module verlängern. So kann im Idealfall die längerfristige Sperrung eines imSLT aufgrund der Reparatur eines Verschleißschadens verhindert werden. Sowohl die verwendeten Ersatzteile als auch die durchgeführten Arbeiten werden im Anschluss an die physische Wartung in einem mit der ID des imSLT verknüpften Wartungsbericht dokumentiert.

Anhand der zuvor festgelegten Wartungszyklen können behälterspezifische Wartungsfristen und -maßnahmen durch den Service ermittelt werden. Diese werden dem Anwender etwa in Form einer Wartungsliste mit zukünftig anstehenden Wartungen von imSLTs angezeigt, damit dieser die Wartungsarbeiten besser planen und entsprechend initiieren kann. Auch der Dienstleister, der die Wartung durchführt, kann durch die Erfassung der ID des imSLT den individuellen Wartungsplan direkt vor Ort einsehen (bspw. über ein Smartphone oder Tablet). Eine dynamische Veränderung der Wartungsfristen und -maßnahmen kann durch Predictive Maintenance hervorgerufen werden. Dabei fließen die Überwachung von Erschütterungen (siehe Service *Zustandüberwachung*) oder der tatsächliche Nutzungsgrad des Behälters (siehe Service *digitales Behältermanagement*) in die Berechnung der Wartungsfristen und -maßnahmen mit ein. Der Nutzer kann sich die Wartungsberichte anzeigen lassen oder exportieren, um so Rückschlüsse auf Schwachstellen in der Behälterkonstruktion oder im Prozess ziehen zu können.

Neben den physischen Tätigkeiten stehen beim Service *Wartung* Funktionalitäten zur Erfassung der ID und zur Dokumentation eines digitalen Wartungsberichts in Verbindung mit passenden Anzeige-, Ausgabe- und Exportfunktionen im Vordergrund.

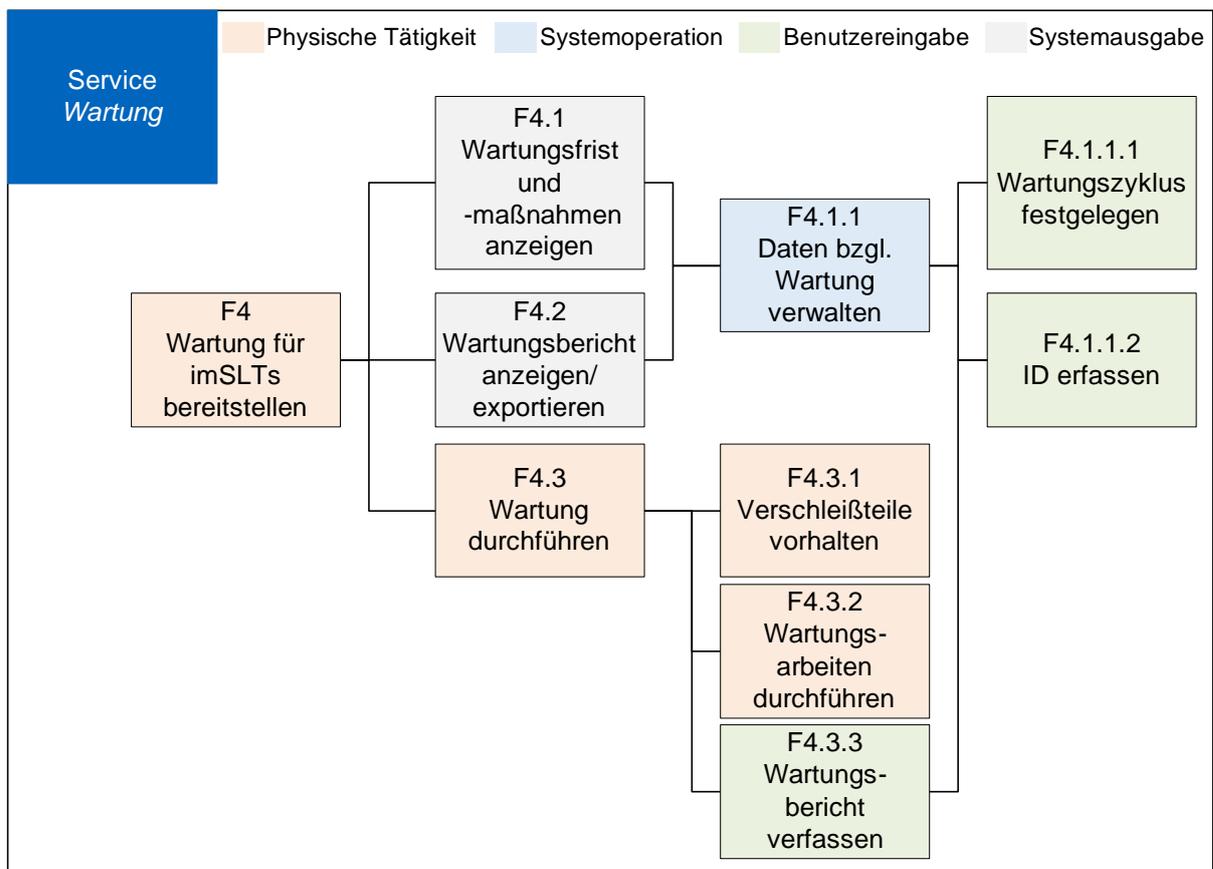


Abbildung 6-7: Erstelltes Funktionsmodell für den Ablauf des Service *Wartung*

Service Reparatur

Die Erweiterung der physischen Reparatur eines Sonderladungsträgers um die digitale Nachvollziehbarkeit der Arbeiten ist das Ziel des *Service Reparatur*. Dabei gestaltet sich die durch Daten unterstützte Instandsetzung (Funktionsmodell siehe Abbildung 6-8) wie folgt. Anhand des durch den *Service digitaler Schadensbericht* bereitgestellten Schadensreports, ein Bericht über vorliegende Beschädigungen (siehe *Service digitaler Schadensbericht*), kann der Schaden bereits vor der Inspektion des beschädigten imSLT analysiert werden. Darauf aufbauend können die Reparaturmaßnahmen geplant und benötigte Materialien beschafft werden. Bei der Durchführung der Reparaturarbeiten kann über die Erfassung der ID des imSLT der zugehörige Schadensbericht vom Reparaturdienstleister direkt vor Ort, bspw. mit einem Tablet, abgerufen werden. Neben der abschließenden Funktions- und QS-Prüfung werden auch alle weiteren Instandsetzungsmaßnahmen digital im Reparaturbericht dokumentiert und mit der ID des imSLT verknüpft. Dabei werden die instandgesetzten oder ausgetauschten Module des imSLT anhand der moduleigenen ID im Reparaturbericht zugeordnet.

Durch seinen modularen Aufbau ermöglicht der imSLT eine schnellere und einfachere Reparatur, da keine Schweißverbindungen wie beim klassischen Sonderladungsträger gelöst und wieder zusammengefügt werden müssen, sondern die Module direkt ge-

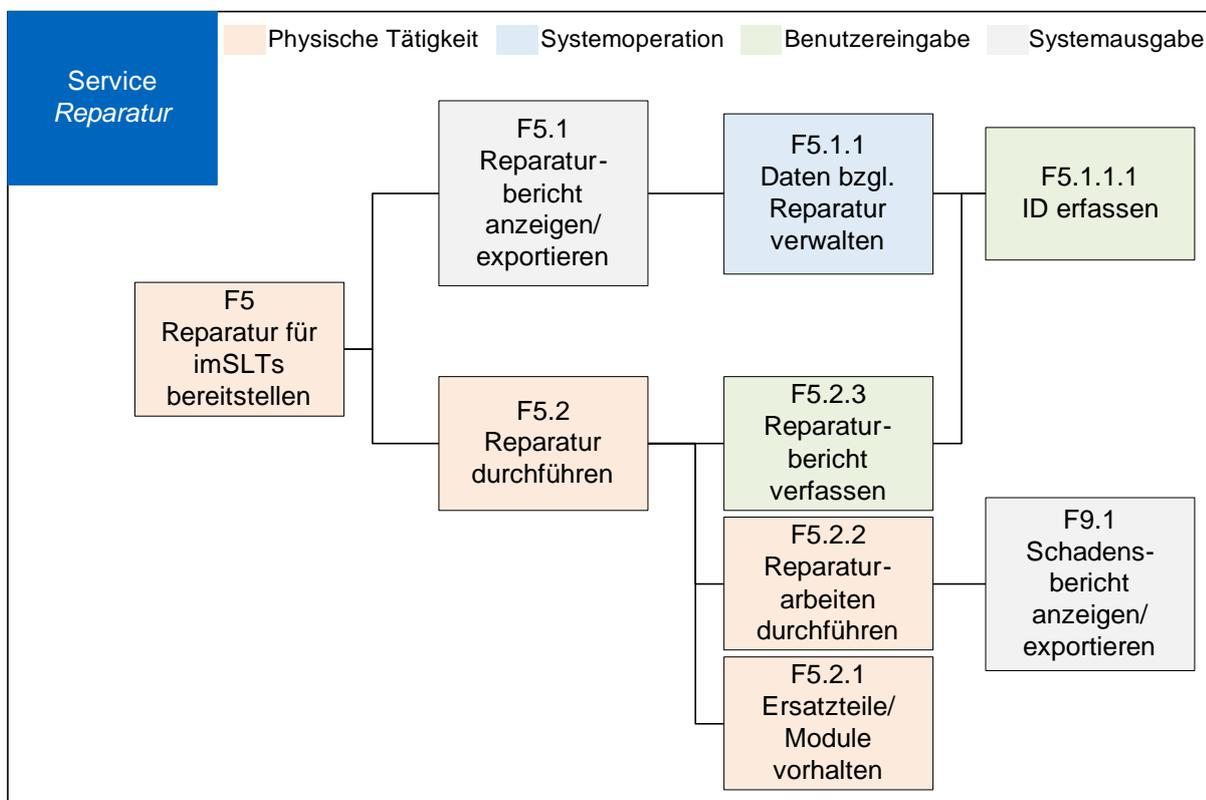


Abbildung 6-8: Darstellung des Service Reparatur anhand seiner Funktionen

tauscht werden können. Somit können zum Teil früher irreparable Schäden an Sonderladungsträgern, dank der modularen Gestaltung des imSLT, rentabel behoben werden. Folglich muss der Behälter nicht mehr komplett entsorgt werden, wodurch sich auch die ökologische Nachhaltigkeit des Ladungsträgers erhöht. Die digital abgelegten Reparaturberichte können im Anschluss durch den Anwender ausgewertet werden und so Verbesserungspotenziale bei der Konstruktion oder innerhalb der Materialflussprozesse leichter identifiziert werden.

Analog zum Service *Wartung* stehen auch beim Service *Reparatur* neben den Funktionalitäten, die physische Tätigkeiten benötigen, der digitale Reparaturbericht und entsprechende Anzeige-, Ausgabe- und Exportfunktionen im Vordergrund.

Service *Reinigung*

Der Service *Reinigung* zielt darauf ab, die Sauberkeit der imSLTs während des Kreislaufs zu erhöhen, um die Qualität der zu transportierenden Bauteile nicht zu beeinträchtigen (Funktionsmodell siehe Abbildung 6-9). Dabei kann die Durchführung der physischen Reinigung durch ein Zeitintervall (Reinigungszyklus) festgelegt oder durch die Erfassung einer Verunreinigung ausgelöst werden. Solche Verunreinigungen können bspw. durch Mitarbeiter während des Betriebs entdeckt und über die Erfassung der ID des imSLT mithilfe eines Tablets dem System mitgeteilt werden. Hauptsächlich soll aber das System selbst Verunreinigungen erkennen. So erkennt das System mithilfe des Service *Zustandsüberwachung* (siehe Service *Zustandsüberwachung*), konkret über die Positions-, Temperatur- und Luftfeuchtigkeitserfassung, wenn ein imSLT nicht überdacht gelagert wird. Ist zur gleichen Zeit Schneefall oder Regen gemeldet, werden diese Behälter dann durch das System als „zu reinigen“ markiert. Der Anwender kann sich die zu reinigenden Behälter als Liste, mit Reinigungsfristen und benötigten Maßnahmen, anzeigen lassen und die Reinigungsarbeiten initiieren. Bei der Reinigung selbst wird die ID des imSLT erfasst und automatisch ein Reinigungsbericht erstellt. Die Reinigung kann bspw. durch eine Waschstraße realisiert werden, welche am Eingang die ID des Behälters erfasst und den Bericht mit Beendigung der Reinigungsarbeiten automatisch erstellt. Der Reinigungsbericht kann auch durch einen Mitarbeiter aufgerufen und bearbeitet werden. Alle erstellten Reinigungsberichte werden durch das System gespeichert und können durch den Anwender angezeigt, ausgewertet und exportiert werden.

Bei der funktionalen Gestaltung des Service wurde darauf geachtet, dass automatisierte Funktionalitäten (sogenannten Systemoperationen) physische Tätigkeiten oder Benutzereingaben durch den Mitarbeiter ersetzen, um so den manuellen Aufwand möglichst gering zu halten.

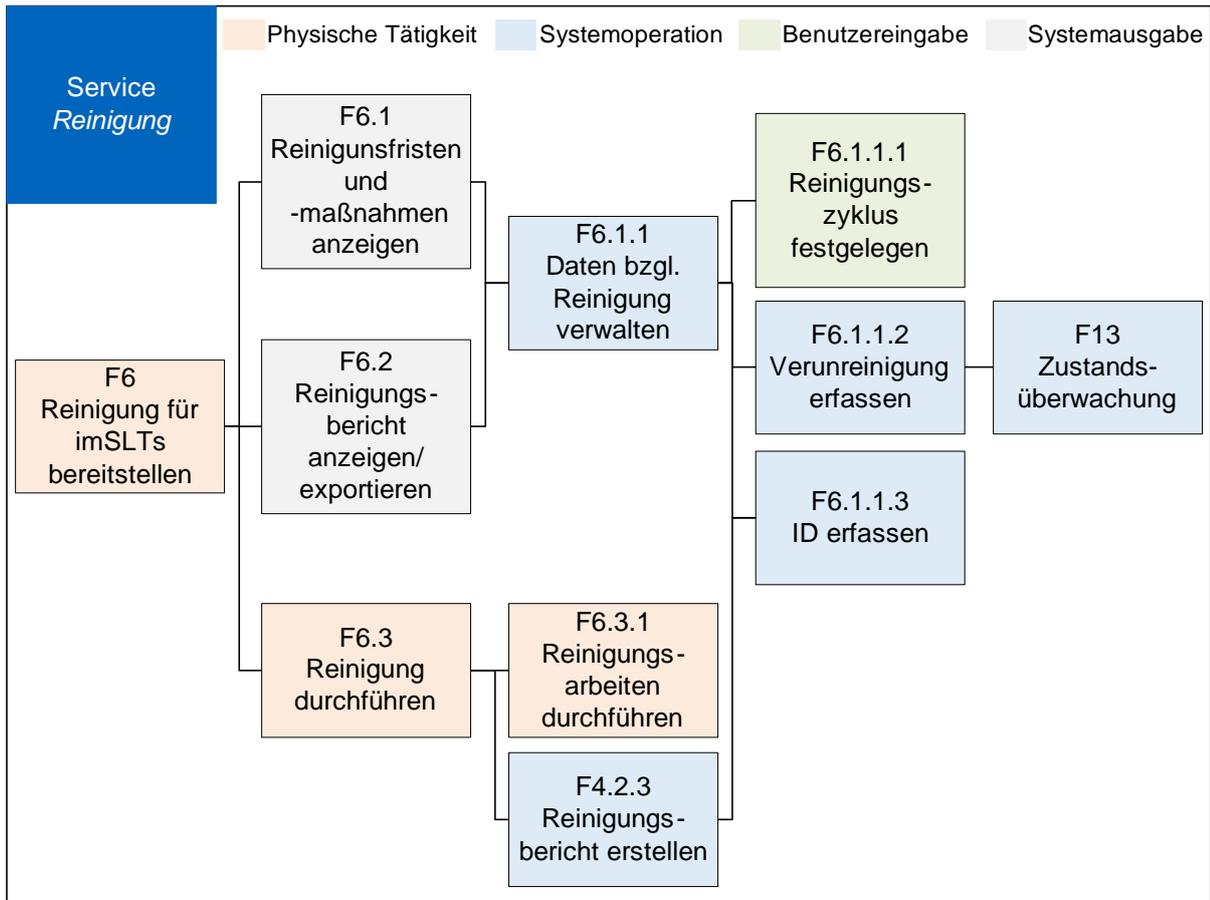


Abbildung 6-9: Funktionsmodell des Service Reinigung mit Fokus auf Systemoperationen

Service imSLT-Konfigurator

Der Service *imSLT-Konfigurator*, ein webbasierter Produktkonfigurator für imSLTs, unterstützt sowohl den OEM als auch den Ladungsträgerhersteller gezielt bei der Entwicklung und Konstruktion (Funktionsmodell siehe Abbildung 6-10). So sollen die Behälterentwicklungs- und Abstimmungsprozesse sowohl für einen neuen Behälter als auch für eine Rekonfiguration vereinfacht und beschleunigt werden.

Konkret erleichtert der Service *imSLT-Konfigurator* den Entwicklungsprozess durch die einfache, webbasierte Konfiguration des gewünschten Ladungsträgers aus standardisierten Modulen und passenden Services. Hierbei wird stets die Kompatibilität der einzelnen Module untereinander als auch in Verbindung mit den gewünschten Services überprüft. Bei der Konfiguration selbst werden immer nur die kompatiblen Elemente angezeigt. Auch ein automatischer Konfigurationsvorschlag, mit optimierter Packdichte, kann anhand eines vorab ausgefüllten Fragebogens und anhand der Daten zum zu transportierenden Bauteil durch das System für den Anwender erstellt werden. Jede Konfiguration kann gespeichert, angezeigt oder auch exportiert werden. Auch die Verfügbarkeiten und Lieferzeiten der einzelnen Module werden während des Konfigu-

rationsvorgangs, basierend auf den Informationen des Service *Pooling-System*, angezeigt. Mit Abschluss der Konfiguration wird ein erneuter Kompatibilitätstest durchgeführt und anschließend werden Preis und Lieferzeiten für die gewünschte Anzahl berechnet. Diese Informationen kann der Anwender neben dem Datenblatt des erstellten imSLT anzeigen oder exportieren. Bei einer Bestellung durch den Anwender werden die Daten des Service *imSLT-Konfigurator* direkt mit den Services *Pooling-System* und *Rekonfiguration* geteilt, um dort entsprechende Maßnahmen für den Auftrag treffen zu können. Ebenso werden für den Pooling-Betreiber bzw. für den Service *Pooling-System* automatisch eine Stückliste und eine Montageanleitung erstellt.

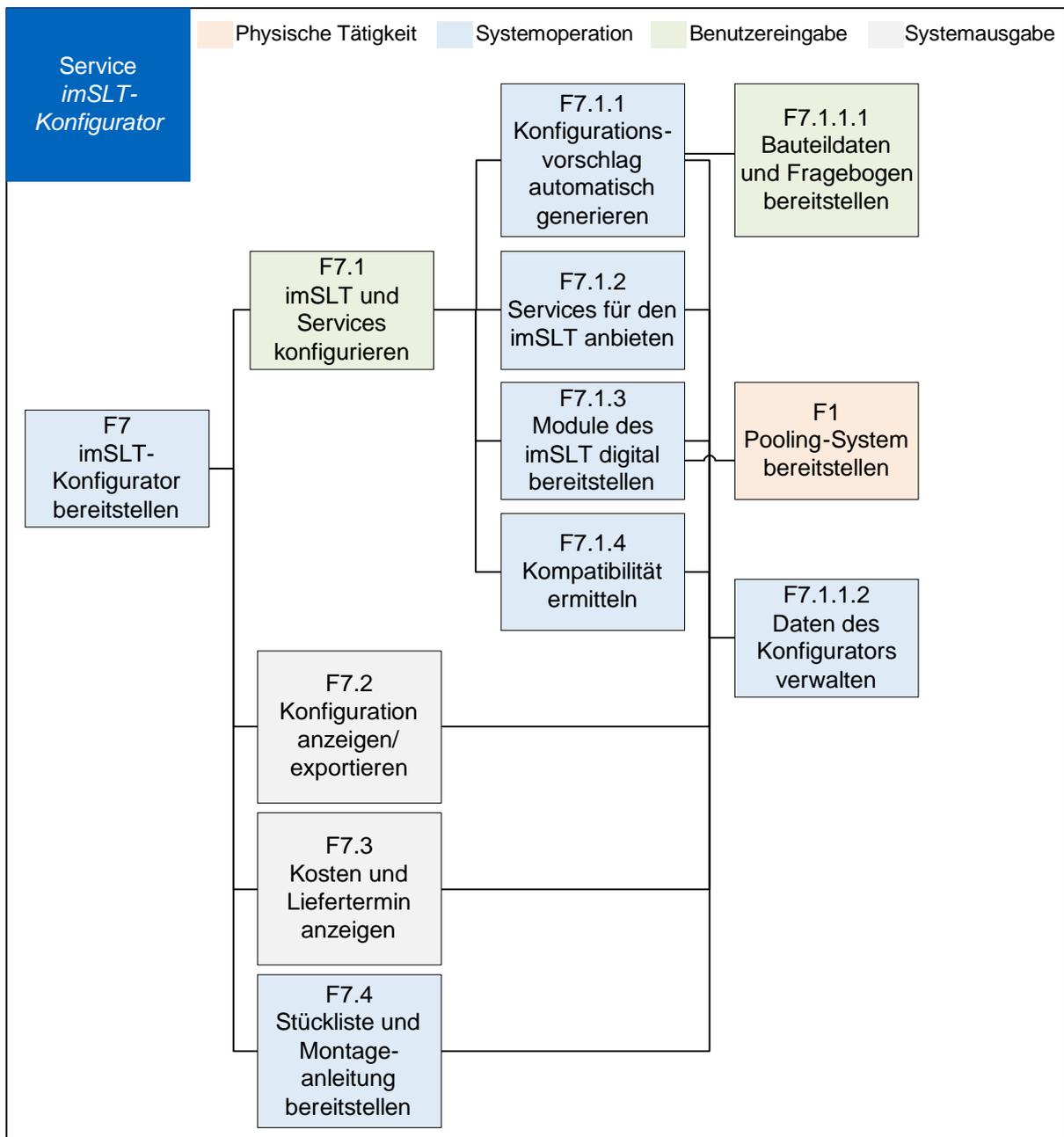


Abbildung 6-10: Hierarchische Struktur der Funktionen des Service imSLT-Konfigurator

Durch den Funktionsumfang des Service *imSLT-Konfigurator* werden der Konfigurations- und Bestellvorgang deutlich vereinfacht und es entfallen aufwendige Abstimmungs- und Abnahmerunden. Die kürzere Entwicklungszeit und die geringere Anzahl von Konstruktionsmängeln aufgrund von standardisierten Modulen ermöglichen dabei eine Steigerung der Anwenderzufriedenheit. Ein Großteil der manuellen Ist-Prozesse der Behälterentwicklung kann dank der modularen Struktur des imSLT für das Funktionsmodell des Service in Systemoperationen bzw. automatisierte Funktionalitäten umgewandelt werden. Vor allem bei der webbasierten Konfiguration stehen benutzergerechte Anzeige-, Ausgabe- und Exportfunktionen stark im Vordergrund.

Service Auftragsverfolgung (für die Herstellung)

Der Service *Auftragsverfolgung* ist für den Herstellungsprozess der imSLTs konzipiert (funktionaler Aufbau siehe Abbildung 6-11). Dieser zeigt dem Anwender den aktuellen Auftragsstatus seiner Bestellung vom Auftragseingang bis zur Auslieferung an. Der Auftragsstatus kann grundsätzlich durch einen Mitarbeiter im System hinterlegt, wie etwa die Annahme der Bestellung, oder durch das System anhand der Produktion und Montagefortschritte bestimmt werden. So kann die Anzahl der produzierten imSLTs durch die Nutzung von Funktionalitäten anderer Services, konkret durch die Positionsbestimmung der bereits produzierten imSLTs (siehe Service *aktuelle Positionen und Bestände*) oder anhand des dokumentierten Montagefortschritts (siehe Service *Pooling-System*), angezeigt werden. Weiter kann durch die angebundnen Daten des Pooling-Systems der aktuelle Liefertermin bestimmt und dem Anwender u. a. in Form einer Ampelkennzeichnung dargestellt werden. Sollte der aktuelle Liefertermin nicht mit dem vereinbarten Terminplan übereinstimmen, wird der Lieferstatus, je nach Lieferverzug,

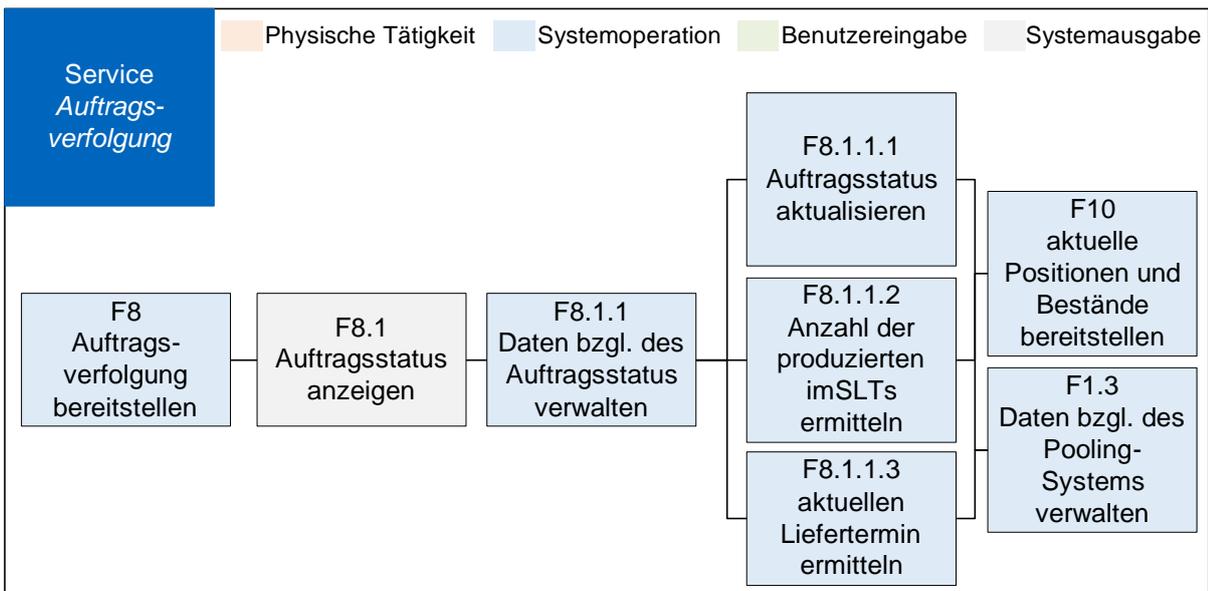


Abbildung 6-11: Darstellung des Service Auftragsverfolgung mit zugehörigen Funktionen

von Grün auf Gelb oder von Grün auf Rot gesetzt. Dadurch wird der Herstellungsprozess des imSLT transparenter und somit der Abstimmungsaufwand zwischen den Partnern verringert. Auch das Vertrauen zwischen Pooling-Betreiber und Anwender kann durch die transparentere Kommunikation gesteigert werden. Deshalb wird der Service soweit wie möglich durch automatisierte Funktionalitäten verwirklicht, um die Benutzereingaben und dadurch die Manipulationsmöglichkeiten des Auftragsstatus möglichst gering zu halten.

Service *digitaler Schadensbericht*

Der Service *digitaler Schadensbericht* (Funktionsmodell siehe Abbildung 6-12) erlaubt es, entstandene Schäden am imSLT direkt vor Ort zu dokumentieren. Dabei kann die ID des imSLT durch den Mitarbeiter erfasst und direkt via Tablet oder Smartphone ein entsprechender Schadensreport für diesen Behälter erstellt werden. Die schnelle und einfache Aufnahme des Schadens, die Zuordnung zu Modulen und die direkte Digitalisierung des Berichts liegen im Fokus des Service. Bei der Schadensaufnahme kann neben einem Bild der Schaden direkt anhand der vorgegebenen Kategorien eingeordnet werden. Wird ein neuer Schadensbericht durch einen Mitarbeiter im System hinterlegt, bekommt der Anwender, bspw. ein Mitarbeiter aus dem Behältermanagement, eine Benachrichtigung und kann so die Reparaturmaßnahmen anstoßen. Auch das Anzeigen bereits vorhandener Schadensberichte direkt am Behälter, u. a. bei der Reparatur, wird basierend auf der Erfassung der ID des imSLT durch den Service möglich.

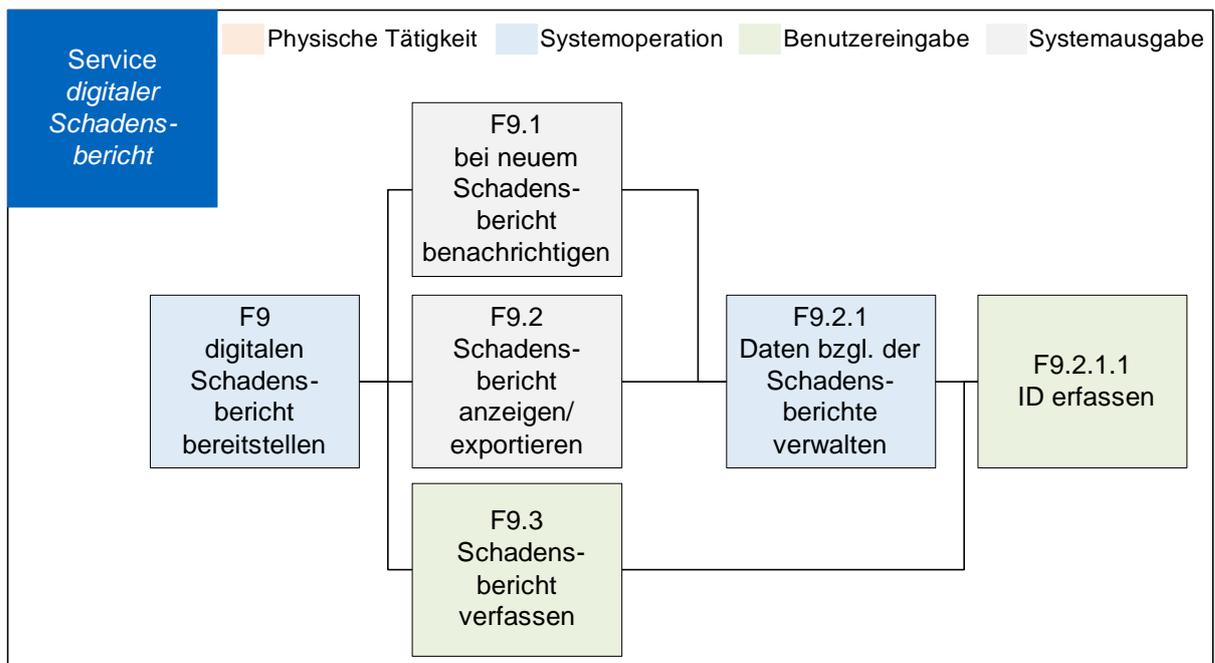


Abbildung 6-12: Funktionen des Service digitaler Schadensbericht

Die Kategorisierung der Schäden innerhalb des Schadensberichts vereinfacht die Reparaturplanung und die nachfolgende Schadensanalysen. Anhand einer Schadensanalyse können Muster bei auftretenden Beschädigungen am Behälter erkannt werden. So können Konstruktionsschwachstellen des imSLT oder Probleme in der Supply Chain identifiziert und Verbesserungsmaßnahmen eingeleitet werden. Durch den Service kann, bei rechtzeitiger Entdeckung und Dokumentation der Schäden, der Verursacher (Unternehmens- und Abteilungsebene) zugeordnet werden, wodurch eine klare, nachvollziehbare Verantwortungsverteilung im Schadensfall möglich ist. Deshalb steht auch beim Service *digitaler Schadensbericht* eine klare und verständliche Darstellung bei der Aufnahme und der Anzeige von Schadensberichten im Vordergrund.

Service *aktuelle Positionen und Bestände*

Der Funktionsumfang des Service *aktuelle Positionen und Bestände* (siehe Abbildung 6-13) ist möglichst schlank gehalten, da dieser Service ein wichtiger Bestandteil anderer Services ist und so leichter als Ganzes in deren Funktionsumfänge integriert werden kann. Generell ermöglicht es der Service die aktuelle Position eines imSLT zu erfassen (Tracking). Dies kann etwa über eine POI-Lokalisierung (Point of Interest-Lokalisierung²¹), ein event-basiertes Tracking (bspw. mit RFID), GPS oder eine andere Lokalisierungstechnologie erfolgen. Dabei wird neben der ID des imSLT dessen aktuelle Position erfasst. Diese kann im Anschluss durch den Nutzer, etwa über ein Dashboard (grafische Benutzeroberfläche, die Daten visualisiert), angezeigt werden. Alternativ können die Daten auch über eine Schnittstelle zum Anwendersystem oder als Tabelle exportiert werden. So können verloren geglaubte Behälter aufgespürt und der Behälterschwund reduziert werden. Um die Zuordnung und Visualisierung von aktuellen Beständen zu erleichtern, kann der Anwender räumliche Bereiche vordefinieren (z. B. den Wareneingang), in denen die Behälter, die sich aktuell in diesem Bereich befinden, gesammelt angezeigt werden. Ebenso erlaubt diese Visualisierung einen Überblick über aktuelle Bestände und vermeidet das aufwendige manuelle Zählen der Ladungsträger vor Ort. So können unternehmensübergreifend drohende Unter- oder Überbestände auf einer digitalen, konsistenten Datenbasis erkannt und entsprechende Maßnahmen eingeleitet werden.

Außer der vorab benötigten Definition der räumlichen Bereiche, kommt der Funktionsumfang des Service ohne Benutzereingaben und physische Tätigkeiten aus. Dies ermöglicht anderen Services ohne weitere menschliche Interaktion die einzelnen Funk-

²¹ Die Positionen der jeweiligen imSLTs werden einem vordefinierten Punkt (meist dem Anbringungspunkt des Gateways, welches den Datensatz des imSLT empfängt) zugeordnet.

tionen des Service *aktuelle Positionen und Bestände* zu nutzen. Die Darstellungsfunktionalitäten (F10.1 und F10.2) können je nach Kombination mit weiteren Services (bspw. in Kombination mit dem Service *digitales Behältermanagement*) bei redundantem Funktionsumfang entfallen.

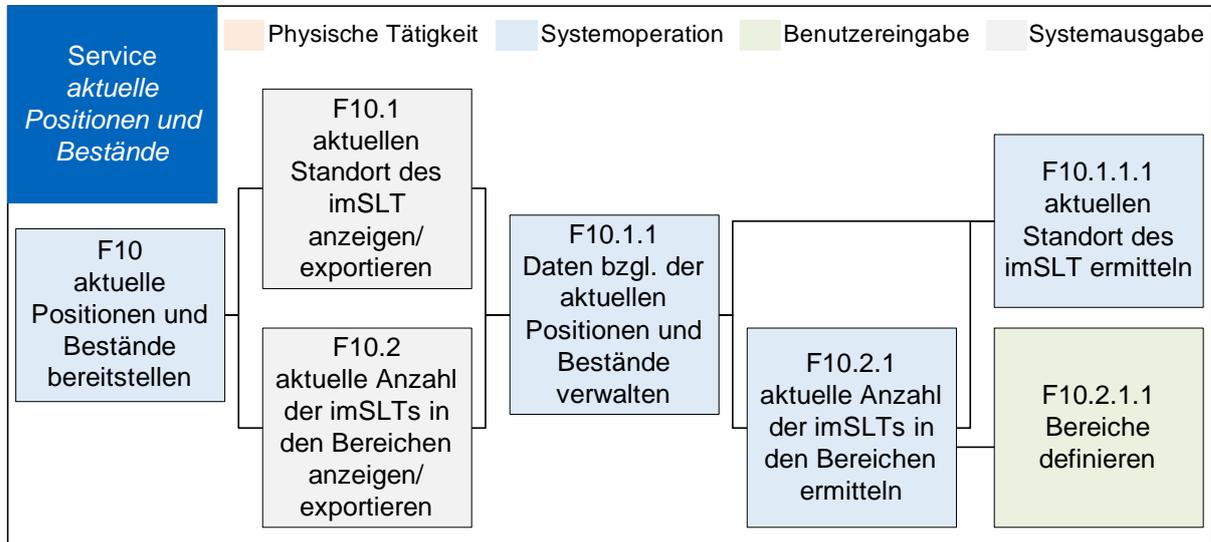


Abbildung 6-13: Funktionsumfang des Service *aktuelle Positionen und Bestände*

Service *digitales Behältermanagement*

Der Service *digitales Behältermanagement* basiert auf den Funktionsumfängen des Service *aktuelle Positionen und Bestände* und bietet über dessen Grundfunktionalitäten hinaus erweiterte Auswertungsfunktionen an (siehe Abbildung 6-14). Hier liegt der Fokus vor allem auf der Analyse des zeitlichen Positionsverlaufs der imSLTs (Tracing). So ermöglicht dieser Service dem Anwender neben dem Positionsverlauf des imSLT für den von ihm gewünschten Zeitraum auch die zeitlichen Verläufe der Bestände in den vordefinierten Bereichen anzuzeigen und zu exportieren. Parallel dazu werden die Bestände auch durch das System anhand der anwenderspezifischen Grenzwerte kontinuierlich überwacht. Wird ein festgelegter Grenzwert für eine vorgegebene Zeitspanne über- oder unterschritten, wird der Anwender aktiv benachrichtigt. So können Bedarfe an imSLTs frühzeitig erkannt und ein Engpass vermieden werden.

Neben den Beständen werden auch die Standzeiten der jeweiligen imSLTs in den definierten Bereichen ermittelt. Diese können durch den Anwender eingesehen und bei Bedarf exportiert werden. Durch das Festlegen einer maximal gewünschten Standzeit der imSLTs, kann der Anwender die Überwachungsfunktion des Systems für Standzeiten nutzen. Dabei wird er bei einer Überschreitung der festgelegten maximalen Standzeit benachrichtigt. So kann der Anwender die imSLTs gleichmäßiger auslasten (Nutzungsgrad bzw. Häufigkeit des Einsatzes) und dadurch Reparaturbedarfe von überbeanspruchten imSLTs vermeiden. Sollte sich ein Behälter nicht mehr melden,

benachrichtigt das System den Anwender aktiv über dessen Verschwinden. Dieser kann sich daraufhin die letzte bekannte Position des imSLT anzeigen lassen und die Ursachen und Verantwortlichkeiten bzgl. des Behälterschwunds klären. Außerdem lässt sich über die Auswertung der gesammelten Positionsdaten, besonders der Standzeiten, durch den Anwender prüfen, ob zu viele oder zu wenige imSLTs im Behälterkreislauf sind. Dabei kann der Anwender bei Bedarf imSLTs über den Service

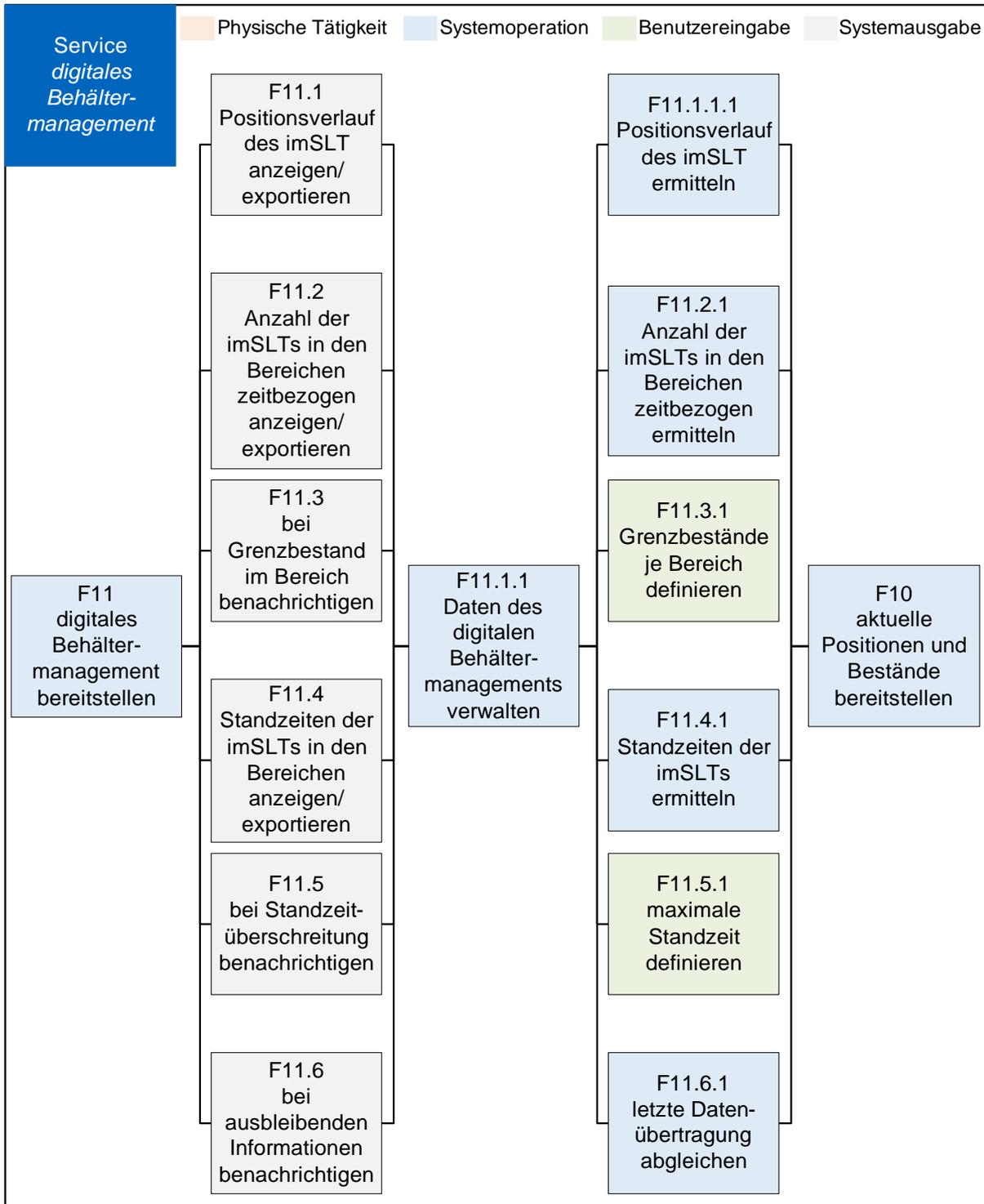


Abbildung 6-14: Funktionshierarchie des Service digitales Behältermanagement

Pooling-System akquirieren oder zurückgeben, um die für die Produktion optimale Behälteranzahl innerhalb des Kreislaufs bereitzustellen. So können Sondertransporte, Einwegverpackungen oder ein übermäßiger Bedarf an Lagerplatz vermieden werden.

Die Visualisierung der Daten ist, wie im Funktionsmodell dargestellt, ein zentraler Bestandteil des Service, da durch eine geeignete Darstellung die Auswertungen durch den Anwender erleichtert werden. Es besteht auch die Möglichkeit die Daten über eine Schnittstelle zum Anwendersystem oder als Tabelle zu exportieren. Zusätzlich sollen durch nur wenige, einmalige Benutzereingaben Systemüberwachungen von Beständen, Standzeiten und Behälterschwund ermöglicht werden.

Service automatisierte Buchung

Auch der Service *automatisierte Buchung* basiert auf den Funktionalitäten des Service *aktuelle Positionen und Bestände* (siehe Abbildung 6-15). Dabei ermöglicht der Service *automatisierte Buchung* die automatische Durchführung und Überprüfung von Behälterbewegungsbuchungen innerhalb der Supply Chain (bspw. Wareneingangs- und Warenausgangsbuchung). Während sich der Service *digitales Behältermanagement* eher auf Behälterbestände fokussiert, liegen die Schwerpunkte des Service *automatisierte Buchung* auf der Überprüfung der Lieferung und der Erfassung der Behälterbewegungen. Dafür benötigt der Service eine Schnittstelle zum Anwendersystem, um relevante Informationen bzgl. der Lieferung zu beziehen bzw. zu übermitteln. Aufbauend darauf werden die IDs der jeweiligen imSLTs, bspw. bei deren Bestückung, mit den entsprechenden Lieferinformationen verknüpft. Dies kann automatisiert über das System oder durch die manuelle Erfassung der ID durch einen Mitarbeiter vor Ort erfolgen (F12.1.1.2: Informationen zur Lieferung hinterlegen). Anhand dieser Informationen und der aktuellen Position des imSLT werden im Anschluss die Behälterbewegung und der Verlauf der Lieferung automatisiert verbucht. Bspw. können nach der erfolgten Bestückung der Warenausgang beim Zulieferer, der Wareneingang beim OEM und die Ankunft am Montageband automatisiert erfasst und in einem Buchungsverlauf dokumentiert werden. Gleichzeitig können die imSLTs einer Lieferung innerhalb der Prozessschritte über ihre ID authentifiziert werden. Der Anwender kann selbst festlegen für welche Prozessschritte er eine Buchungsbestätigung möchte (F12.1.1.1: Buchungspunkte definieren).

Die jeweiligen automatisiert durchgeführten Buchungen können direkt angezeigt oder über eine Schnittstelle zum Anwendersystem bzw. als Tabelle exportiert werden. So entfallen fehleranfällige manuelle Buchungsprozesse von Behälterlieferungen. Gleichzeitig erhöht sich die Transparenz und Prozessqualität. Bei einer Abweichung zwischen Lieferinformationen und durchgeführter Buchung, bspw. bei falscher Liefermenge, -inhalt oder Reihenfolge (Just-In-Sequence Lieferungen), wird der Anwender

aktiv benachrichtigt. So können Fehler frühzeitig erkannt und Maßnahmen eingeleitet werden.

Der Funktionsumfang des Service *automatisierte Buchung* ist so gestaltet, dass dieser möglichst automatisch durchgeführt werden kann. Deshalb sind nur bei der Initialisierung des Service Benutzereingaben bzgl. der gewünschten Buchungspunkte nötig.

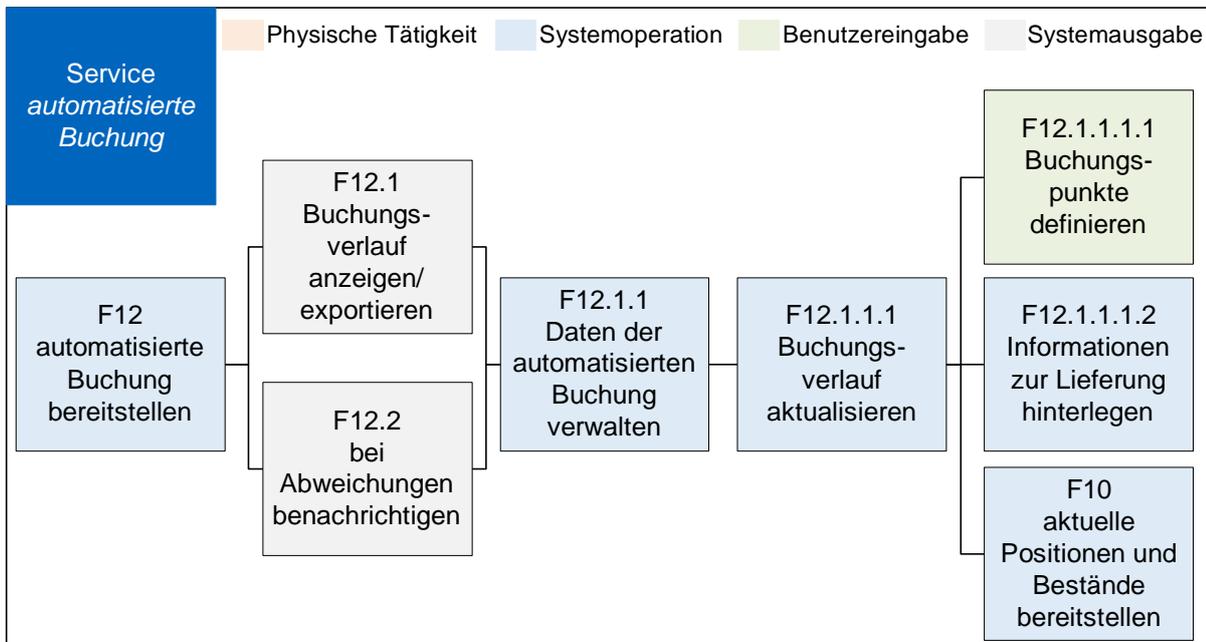


Abbildung 6-15: Benötigte Funktionen für den Service *automatisierte Buchung*

Service Zustandsüberwachung

Mithilfe des Service *Zustandsüberwachung* (siehe Abbildung 6-16) ist es dem Anwender möglich relevante Zustandsgrößen zur Umgebung oder zum imSLT selbst zu überwachen. Zustandsgrößen können hier etwa der Füllstand des Behälters, die Umgebungstemperatur, die Luftfeuchtigkeit, die Umgebungshelligkeit oder die Erschütterungen und Neigung des imSLT selbst sein. Dabei können sowohl die aktuellen Werte als auch deren zeitlicher Verlauf, inkl. der Position der durchgeführten Messung, visualisiert oder als Tabelle exportiert werden. Der Anwender kann Grenzwerte für die jeweiligen Zustandsgrößen vorgeben, bei denen er benachrichtigt werden möchte. Durch diese Funktion wird der Anwender etwa bei einer starken Erschütterung des imSLT, welche auf einen Unfall hinweisen könnte, benachrichtigt. Durch die sofortige Benachrichtigung ist es möglich eine schnelle Klärung des Sachverhalts einzuleiten und, falls Produkte beschädigt wurden, eine Nachbestellung auszulösen. Ebenso ist es durch die in der Benachrichtigung vermerkte Position des Vorfalles möglich, die verantwortlichen Parteien zu identifizieren. Die kontinuierliche Kontrolle von Grenzwerten kann darüber hinaus auf Fehlverhalten, wie etwa eine unerlaubte, nicht überdachte Lage-

nung, aufmerksam machen. Auch hier können anhand der Positionsdaten die Verantwortlichen identifiziert und die entstandenen Kosten (bspw. für die Reinigung) entsprechend zugeordnet werden. Mithilfe der gesammelten Zustandsdaten können neben direkten Auswertungen bzgl. des Behälterkreislaufs auch indirekte Rückschlüsse auf andere Unternehmensbereiche, wie die Identifikation von unergonomischen Arbeitsbedingungen (u. a. über die Temperaturerfassung) für die Mitarbeiter in der Bestückung, gezogen werden.

Insgesamt erhöht sich durch den Service *Zustandsüberwachung* die Prozesstransparenz. Der Anwender wird dabei unterstützt schneller und effizienter auf auftretende Probleme in der Lieferkette zu reagieren. Er kann anhand der erfassten Zustandsdaten und Positionen Schäden auf deren Ursache zurückführen, die Verantwortlichen identifizieren und Verbesserungsmaßnahmen einleiten. Das Funktionsmodell des Service *Zustandsüberwachung* ist dabei so gestaltet, dass dieses die Funktionalitäten unabhängig von der verbauten Sensorik und Kommunikationstechnik (bspw. intervall- oder ereignisbasierte Übertragung) beschreibt. Das wichtigste Element ist die Visualisierung der Zustandsgrößen. Diese sollte so gestaltet sein, dass Zusammenhänge auf einen Blick durch den Anwender erkennbar sind.

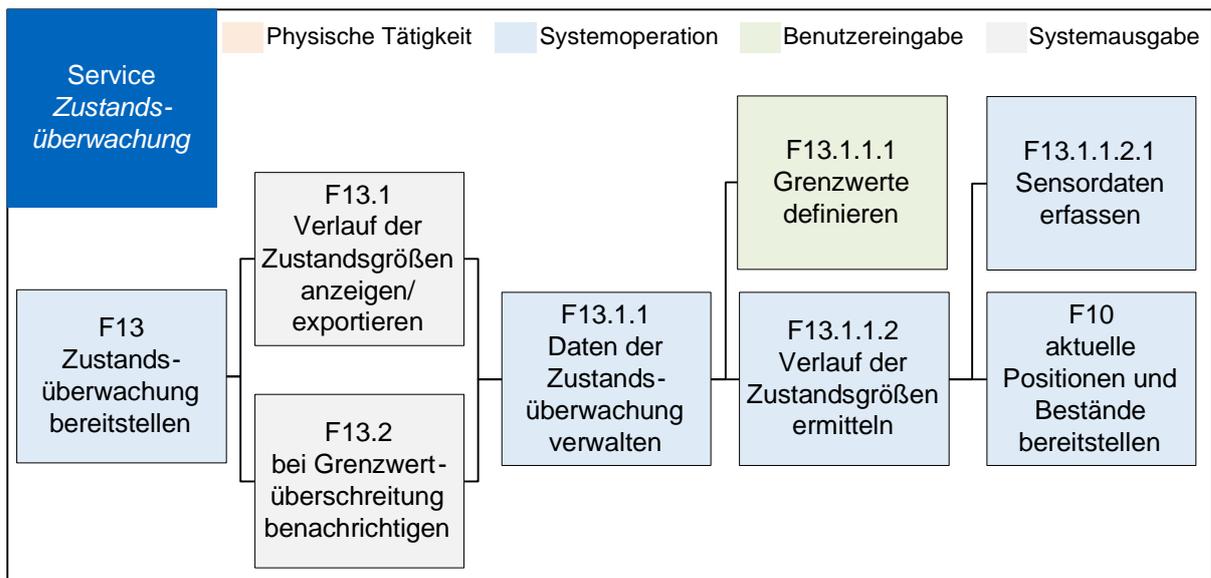


Abbildung 6-16: Beschreibung der Funktionen des Service Zustandsüberwachung

Service Lebenszyklusüberwachung

Die Sammlung aller entlang des Lebenszyklus des imSLT und seiner einzelnen Module entstandenen Daten wird durch den Service *Lebenszyklusüberwachung* realisiert (siehe Abbildung 6-17). Dabei steht die kombinierte Auswertung der aus verschiedenen Services stammenden Daten durch den Anwender für eine Ursachenforschung bzgl. Beschädigungen, Produktionsengpässen, Unter- oder Überbeständen, Konstruktionsschwachstellen, etc., im Vordergrund. Ebenfalls kann anhand der Daten die CO₂-

Bilanz des imSLT, von der Herstellung des einzelnen Moduls über den Einsatz bis hin zum Recycling, erstellt werden. Eine Optimierung der Konstruktion des imSLT oder der einzelnen Module kann auf Basis von Einsatz-, Reparatur-, Wartungs- und Zustandsdaten durchgeführt werden. Auch Rückschlüsse auf die Produktion, z. B. auf Taktzeitschwankungen, die Anzahl der produzierten Endprodukte, das Auftreten von Wartezeiten oder Ausschussquoten (Anzahl der gelieferten vs. verbauten Teile) können durch den Anwender, je nach Datenlage, gezogen werden. Mithilfe der aufgezeichneten Materialflussbewegungen, können Prozesse analysiert, Muster erkannt und Verbesserungen abgeleitet werden (z. B. mit einem Sankey-Diagramm). Darauf aufbauend können Transportwege und -zeiten optimiert werden. Auch die klassischen, unternehmensinternen Berechnungsmethoden zur Bestimmung der benötigten Anzahl von imSLTs im Behälterkreislauf können anhand der erhobenen Daten für zukünftige

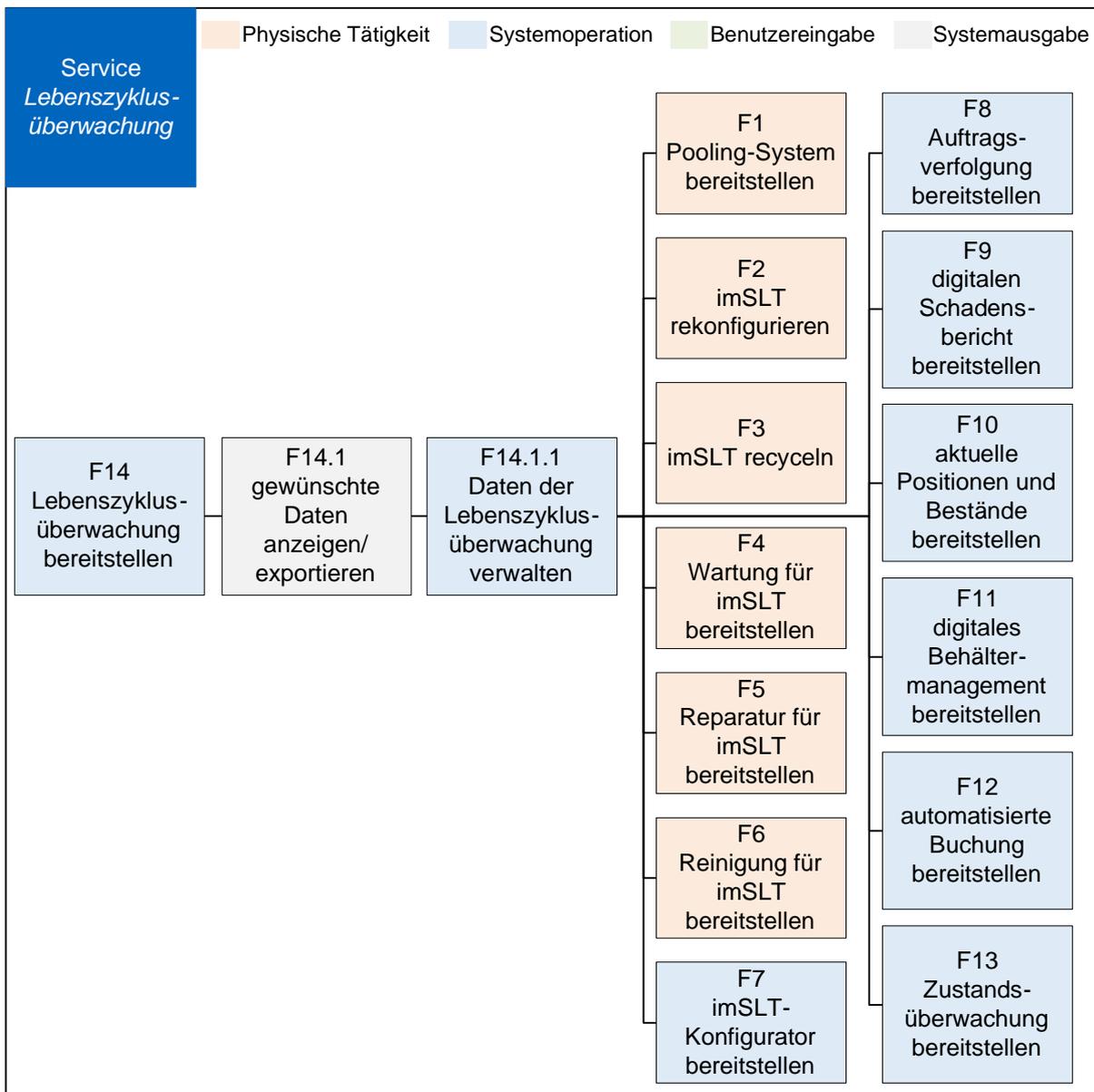


Abbildung 6-17: Zusammenführung der gesammelten Daten im Service Lebenszyklusüberwachung

Kreisläufe angepasst werden. Ebenso ist die Einspeisung der Daten in einen digitalen Zwilling²² denkbar, um so Prognosen bzgl. des Behälterkreislaufs treffen zu können. Die Art und Durchführung der Auswertung der Daten, die durch den Service *Lebenszyklusüberwachung* bereitgestellt werden, obliegt den jeweiligen Anwendern.

Das Funktionsmodell des Service *Lebenszyklusüberwachung* entspricht einem Sammelbecken für die Daten aller anderen Services. Die gesammelten Daten können durch den Anwender visualisiert oder exportiert werden. Die einzelnen Datensätze sind durch die anwenderspezifischen Zugriffsberechtigungen geschützt (siehe Abschnitt 6.5).

6.2.2 Zuordnung der Services zu Nutzenkategorien

Eine Nutzenkategorie fasst den durch den Einsatz der konzipierten Services zu erzielenden Nutzen in einer übergeordneten Zielsetzung zusammen. Dabei beziehen sich diese Kategorien konkret auf die Ursachen der identifizierten Schwachstellen (siehe Abschnitt 5.2). Wie in [Zei-2020a] veröffentlicht, werden sieben Nutzenkategorien, aufgelistet in Tabelle 6-1, aufgestellt. Diese dienen im späteren Verlauf der Arbeit als Grundlage für die Nutzevaluierung (siehe Abschnitt 7.4).

Tabelle 6-1: Zuordnung der identifizierten Nutzenkategorien zu Nutzeneffekten [in Anlehnung an fml-2020, S. 56]

Nr.	Nutzenkategorie	Nutzeneffekt
1	Verbesserung der Transparenz	Prozess
2	Erhöhung der Automatisierung und Standardisierung	
3	Sicherstellung der Einhaltung von Lieferzeiten und Produktqualität	
4	Reduzierung von Schäden und Reparaturaufwand	
5	Steigerung der Kundenzufriedenheit	Kunde
6	Realisierung einer klaren Verantwortungsverteilung	
7	Verbesserung der ökologischen Nachhaltigkeit	Umwelt

Die einzelnen Nutzenkategorien werden jeweils einem Nutzeneffekt, einer zu beeinflussenden Zielgröße, zugeordnet. Der Nutzeneffekt unterscheidet zwischen Prozess, Kunden und Umwelt. Auf den finanziellen Nutzeneffekt (vgl. [Gra-2020]) wird aufgrund

²² Der digitale Zwilling ist ein virtuelles Abbild von Produkten, Dienstleistungen oder Prozessen, welches mit aktuellen Daten aus dem laufenden Betrieb versorgt und entsprechend angepasst wird. Neben der Speicherung von Lebenszyklusdaten kann der digitale Zwilling auch für die Durchführung von Simulationen genutzt werden [Pis-2020, S. 48].

der Zielsetzung dieser Arbeit nicht explizit eingegangen (monetäre Nutzeneffekte liegen nicht im Fokus des Architekturkonzepts). Im Folgenden werden die identifizierten Nutzenkategorien, gegliedert nach ihren Nutzeneffekten, vorgestellt. Die Erarbeitung der Nutzenkategorien und die Einteilung der Services wurden dabei durch einer Studienarbeit (vgl. [fml-2020]) unterstützt.

Prozessauswirkung

Services, deren Nutzen gezielt den Prozess beeinflussen, verändern die Abläufe und Strukturen innerhalb der Logistikprozesse und ermöglichen eine Verbesserung der Prozessqualität. Einige der vorgestellten Services zielen auf die *Verbesserung der Transparenz* innerhalb der Prozesse der Behälterentwicklung, -herstellung und des Behältereinsatzes ab, um dem Anwender eine solide Datenbasis für seine Entscheidungen bereitzustellen. Dabei werden u. a. aktuelle Bestände, Standorte, Bewegungen und Zustände der Behälter (bspw. Temperatur) unternehmensübergreifend erfasst und können durch den Anwender ortsunabhängig aufgerufen und ausgewertet werden. Der Anwender soll so die Möglichkeit bekommen, dank der erhöhten Transparenz im Behälterkreislauf, temporäre Unter- und Überbestände oder etwaigen Ladungsträgerschwund frühzeitig zu erkennen und dementsprechend zu verhindern. Auch Berichte zur Reparatur, Wartung oder Reinigung und die Auftragsverfolgung bei der Herstellung sollen zur Transparenzsteigerung innerhalb des Behältermanagements beitragen. So gewährt die neue belastbare Datengrundlage tieferegehende Auswertungsmöglichkeiten und soll damit die Ableitung von benötigten Verbesserungsmaßnahmen erleichtern.

Darüber hinaus soll der imSLT in Verbindung mit den vorgestellten Services eine *Erhöhung der Automatisierung und Standardisierung* von Prozessen ermöglichen. Das Ziel ist es manuelle Aufgaben durch Services digital zu ergänzen oder sogar komplett zu ersetzen. Dadurch sollen Tätigkeiten und Prozesse für den Mitarbeiter vereinfacht und vereinfacht werden, wie z. B. durch den digitalen Reparaturbericht. Dementsprechend sinkt das Fehlerrisiko. Durch den Einsatz der Services sollen ebenso die manuellen Prozesse der Wareneingangsbuchung oder der täglichen Behälterbestandszählung entfallen. Bei der Konfiguration eines neuen imSLT werden standardisierte Module und Konfigurationsvorgänge durch den webbasierten imSLT-Konfigurator vorgegeben. So soll neben der Herstellung des Ladungsträgers selbst der Behälterentwicklungsprozess vereinfacht werden. Die modulare Struktur des Ladungsträgers soll zudem, basierend auf den standardisierten Modulen, die Komplexität innerhalb der Einsatzprozesse reduzieren (u. a. beim Reparatur- oder Montageprozess der imSLTs).

Die *Sicherstellung der Einhaltung von Lieferzeiten und Produktqualität* innerhalb der Supply Chain entspricht einer weiteren Nutzenkategorie. Hier ist vor allem die automatische Nachverfolgung und kontinuierliche Zustandsüberwachung der imSLTs ausschlaggebend. So sollen die Unternehmen aufkommende Probleme schneller und leichter identifizieren, z. B. durch die Überschreitung von Grenzwerten oder durch das Aufzeigen von Engpässen. Sie können so frühzeitig Gegenmaßnahmen ergreifen, um eine termingerechte Anlieferung der Ware sicherzustellen. Die Gewährleistung der gelieferten Produktqualität soll u. a. durch die regelmäßige oder ereignisbasierte Reinigung der Behälter unterstützt werden. Diese zielt auf eine vorbeugende Wirkung gegen die Verschmutzung der Produkte (bspw. empfindliche Oberflächen aus Stoff) durch unsaubere imSLTs ab.

Eine weitere Nutzenkategorie ist die *Reduzierung von Schäden und Reparaturaufwand*. Die hier zugeordneten Services zielen darauf ab langfristig die Schäden und den Reparaturaufwand zu reduzieren. Durch eine regelmäßige Wartung der imSLTs sollen schwerwiegende Schäden verhindert und so der Reparaturaufwand gesenkt werden. Auch die Überwachung der Auslastung der Ladungsträger soll dabei das Ziel unterstützen, Verschleißschäden aufgrund von übermäßiger Nutzung einzelner imSLTs möglichst gering zu halten. Ebenso soll neben den Schadens-, Reparatur- oder Wartungsberichten die nachträgliche Analyse der Standort- und Zustandsdaten helfen, die Ursachen von aufgetretenen Schäden zu identifizieren. Dementsprechend sollen mit deren Behebung, zukünftige Schäden und damit auch der Reparaturaufwand reduziert werden.

Kundenauswirkung

Die konzipierten Services, deren Nutzen sich auf die Kundenbeziehungen fokussieren, werden der Kundenauswirkung zugeordnet. So soll, bspw. durch den Service Auftragsverfolgung, eine Kommunikationsschnittstelle zwischen Pooling-Betreiber und Kunde geschaffen werden, durch die sich das Vertrauen des Kunden und dessen Planungssicherheit erhöhen. Dieser Service dient somit neben der Transparenzsteigerung der Prozesse auch der *Steigerung der Kundenzufriedenheit*. Der vereinfachte Behälterentwicklungsprozess soll durch einen intuitiven und einfach zu bedienenden imSLT-Konfigurator zur Erhöhung der Kundenzufriedenheit beitragen. Die angebotene Mengenfähigkeit bzgl. der eingesetzten imSLTs zielt ebenfalls darauf ab, neben der Verfügbarkeit die Zufriedenheit der Kunden zu erhöhen. Des Weiteren können auch unbeabsichtigte Nebeneffekte von Services (wie bei *Wartung, Reinigung* oder *Reparatur*), die einen problemärmeren, transparenteren Behälterkreislauf ermöglichen, eine indirekte Verbesserung der Kundenzufriedenheit erzielen.

Eine weitere Nutzenkategorie ist die *Realisierung einer klaren Verantwortungsverteilung*. Dabei steht die eindeutige Zuordnung von Verantwortlichkeiten bei aufgetretenen Problemen im Vordergrund. Durch die konzipierten Services soll sich die Vorgehensweise bei einem Stör- oder Schadensfall verändern, da anhand der gesammelten Daten der Verursacher, auch rückwirkend, nachgewiesen werden kann. So sollen die Teilnehmer des Behälterkreislaufs die entstandenen Kosten besser zuordnen und die daraus resultierenden Verpflichtungen für alle Beteiligten ermitteln können. Im Vordergrund stehen hier Positions- und Zustandsdaten, welche durch eine Auswertung des Schadensberichts unterstützt werden können.

Umweltauswirkung

Der dritte zu betrachtende Nutzeneffekt bezieht sich auf die Umwelt. Dabei gibt es innerhalb dieses Nutzeneffekts nur eine Nutzenkategorie, die sich auf die *Verbesserung der ökologischen Nachhaltigkeit* konzentriert. Einer der Hauptaspekte ist die Wiederverwendung bereits genutzter Module für weitere imSLT-Typen. So soll, durch die Vermeidung der Verschrottung des Behälters nach meist nur einem Nutzungszyklus, ein Beitrag zur ökologischen Nachhaltigkeit geleistet werden. Auch sollen eine regelmäßige Wartung und Reparatur der imSLTs schwerwiegende Schäden und die damit oft verbundene Verschrottung des gesamten Behälters verhindern oder verzögern. Somit soll langfristig die Lebensdauer der einzelnen Module verlängert werden, wodurch sich die ökologische Nachhaltigkeit verbessert. Außerdem soll auch die errechnete CO₂-Bilanz von der Produktion über die Nutzung bis zum Recycling der imSLT-Module einen indirekten Beitrag zur ökologischen Nachhaltigkeit leisten. Anhand dieser Bilanz können die Unternehmen die ökologische Nachhaltigkeit ihres Behältereinsatzes quantitativ messen, um darauf aufbauend entsprechende Maßnahmen zur Verbesserung der Nachhaltigkeit zu ergreifen. Der Effekt dieser Maßnahmen kann dann anhand der neu errechneten CO₂-Bilanz quantitativ validiert werden.

Tabelle 6-2 fasst die Zuordnung der Services, entsprechend ihrer in Unterabschnitt 6.2.1 beschriebenen Nutzen, zu den einzelnen Nutzenkategorien zusammen. Primäreffekte (die primären Ziele des Service) sind schwarz und Sekundäreffekte (erzielt über weiterführende Auswertungen) grau gekennzeichnet. Weitere unbeabsichtigte Nebeneffekte von Services, wie bspw. die indirekte Verbesserung der Kundenzufriedenheit durch einen problemärmeren, transparenteren Behälterkreislauf, sind nicht explizit dargestellt. Die Einordnung der einzelnen Services in Nutzenkategorien dient einem ersten Abgleich mit den identifizierten Schwachstellen, deren Ursachen und aufgestellten Anforderungen aus Kapitel 5. Dabei zeigt Tabelle 6-2, dass der Nutzen der konzipierten Services die identifizierten Probleme direkt adressiert. Eine tiefgehende Beschreibung der einzelnen Nutzen je Service erfolgt an dieser Stelle nicht, da dies bereits in den vorhergehenden Absätzen und in Unterabschnitt 6.2.1 erfolgt ist.

Tabelle 6-2: Zuordnung der einzelnen Services zu den Nutzenkategorien anhand der Primär- und Sekundäreffekte

	Prozess				Kunde		Umwelt
	Transparenz	Automatisierung/ Standardisierung	Lieferzeit und Produktqualität	Schäden und Reparaturaufwand	Kunden- zufriedenheit	Verantwortungs- verteilung	Nachhaltigkeit
Pooling-System	X	X			X		X
Rekonfiguration							X
Recycling	X	X					X
Wartung	X	X		X			X
Reparatur	X	X		X			X
Reinigung	X	X	X		X		
imSLT-Konfigurator		X			X		
Auftragsverfolgung	X	X			X		
digitaler Schadensbericht	X	X		X		X	
aktuelle Positionen und Bestände	X	X	X	X		X	
digitales Behältermanagement	X	X	X	X		X	
automatisierte Buchung	X	X			X		
Zustandsüberwachung	X	X	X	X		X	
Lebenszyklusüberwachung	X			X			X

X Primäreffekt

X Sekundäreffekt

6.3 Konzeptionelles Datenmodell

Im Folgenden wird das konzeptionelle Datenmodell, oft auch nur als Datenmodell bezeichnet (vgl. [Jar-2016, S. 24,]), welches für den Einsatz der Services benötigt wird, vorgestellt. Es beinhaltet die implementierungsunabhängige Struktur der zu verarbeitenden Daten sowie deren Beziehungen. Das konzeptionelle Datenmodell ist serviceübergreifend (aufgrund der Vielzahl von Querverbindungen zwischen den einzelnen Services sowie deren benötigten Daten) in Abbildung 6-18 als UML-Klassendiagramm (vgl. [Hit-2005, S. 52ff.]) dargestellt (Legende siehe Abbildung 6-19). Die Konzeption des Modells wurde durch zwei Studienarbeiten (vgl. [fml-2018a] und [fml-2018e]) unterstützt.

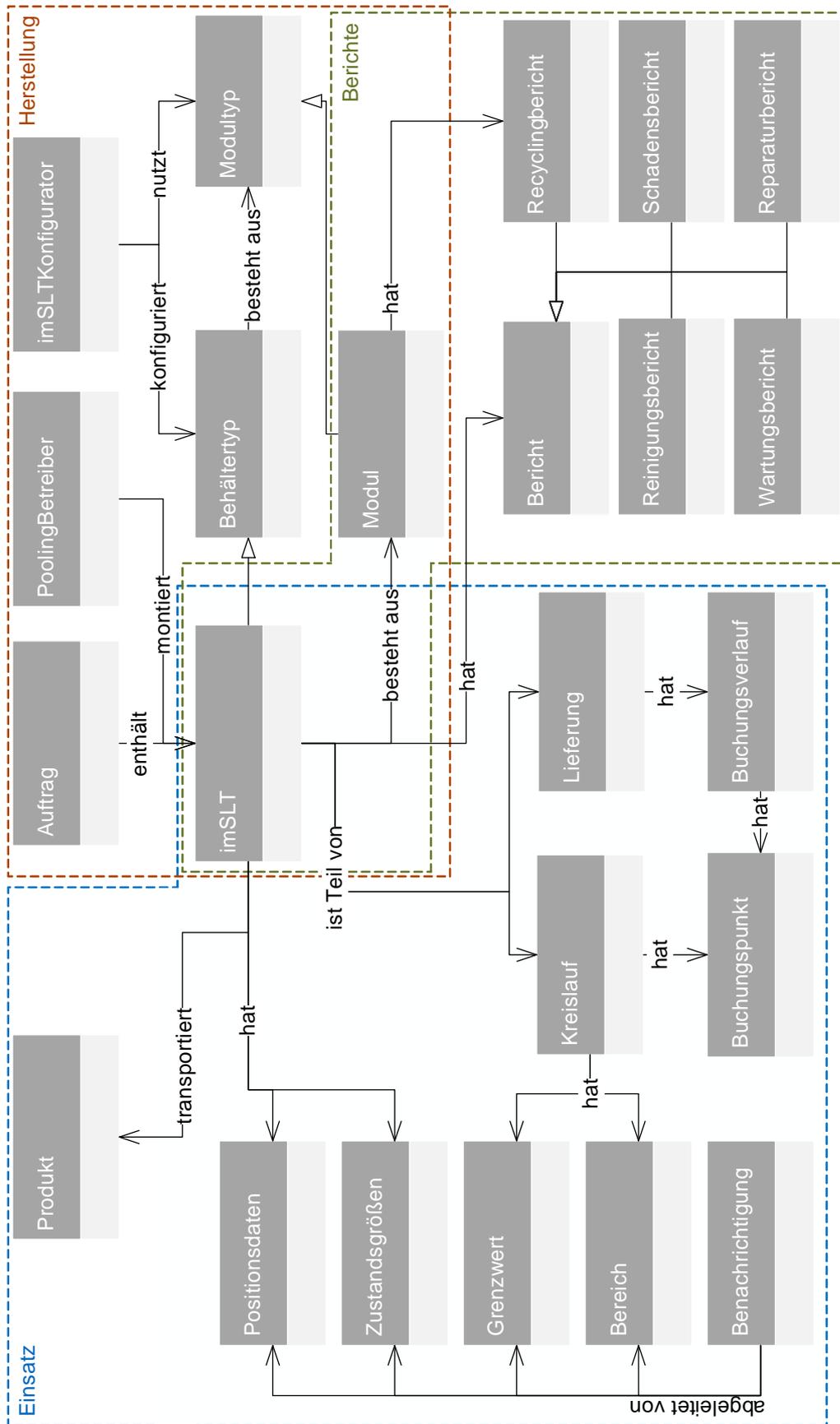


Abbildung 6-18: Vereinfachte Darstellung des konzeptionellen Datenmodells für die erarbeiteten Services und Funktionsumfänge

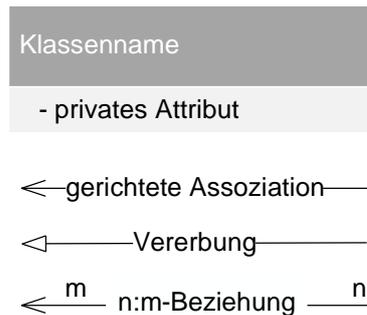


Abbildung 6-19: Legende für die erstellten UML-Klassendiagramme

Wie in Abbildung 6-18 zu sehen, ist die Datenklasse *imSLT* der zentrale Baustein des Datenmodells, um den sich die anderen Datenklassen gruppieren. Dies resultiert aus der Tatsache, dass der *imSLT* der Ausgangspunkt für viele der konzipierten Services ist. Die Klasse *imSLT* steht zu den meisten anderen Datenklassen in direkter oder indirekter Beziehung. Da die Darstellungsmöglichkeiten innerhalb dieser Arbeit begrenzt sind, wird das Gesamtmodell im Folgenden anhand der drei Bereiche Herstellung (braun), Einsatz (blau) und Berichte (grün) genauer erläutert. Dabei wird auf die einzelnen Klassen sowie deren Attribute und Beziehungen eingegangen.

Hervorzuheben ist, dass die Daten der drei Bereiche eng miteinander verwoben sind und sie von den Services bereichsübergreifend genutzt werden. In den folgenden Detaildarstellungen werden, aufgrund der Vielzahl von erarbeiteten Attributen, nur jene aufgelistet, die für das Verständnis der Arbeit ausschlaggebend sind.

Herstellung

Der in Abbildung 6-18 braun umrandete Bereich (Herstellung) ist in Abbildung 6-20 detailliert dargestellt. Der Großteil der Datenklassen in diesem Bereich bezieht sich auf die Herstellung der *imSLTs*. Mittig links in der Abbildung befindet sich die Klasse *imSLT*, die neben der eindeutigen ID und dem Eigentümer das Datum der nächsten Reinigung und Wartung als Attribute besitzt. Auch identifizierte Verunreinigungen, etwa durch einen Mitarbeiter während der Bestückung, werden direkt dieser Datenklasse zugeordnet. Mithilfe dieses Attributs kann der Service *Reinigung* auch ereignisbasiert ausgelöst werden. Die Klasse *imSLT* erbt alle Attribute der Klasse *Behältertyp*, welche die physischen Eigenschaften (bspw. Höhe, Breite, Länge und Gewicht) des Behältertyps als Attribute vereint. Ein weiteres Attribut dieser Klasse ist die Montagezeit für den jeweiligen Behältertyp, welche als Ausgangsbasis für die Lieferzeitberechnung bei der Bestellung dient. Jeder Datensatz der Klasse *Behältertyp* ist mit einer eindeutigen ID versehen, um diese den jeweiligen *imSLTs* zuordnen zu können. Analog dazu besitzen alle anderen Klassen des Datenmodells ebenso Attribute, in de-

nen die ID des jeweiligen Datensatzes hinterlegt werden kann. Nicht relevante Attribute, wie der Behältertypname, sind aufgrund der vereinfachten Darstellung des konzeptionellen Datenmodells nicht aufgelistet. Innerhalb der Klasse *Behältertyp* sind außerdem das Reinigungs- und Wartungsintervall sowie der Wartungsplan, eine Liste mit durchzuführenden Wartungsarbeiten, hinterlegt. Somit werden durch den Anwender zu jedem Behältertyp gewünschte Intervalle vorgegeben und diese automatisch von den einzelnen imSLTs des jeweiligen Typs übernommen. Der nächste Wartungstermin (Teil der Klasse *imSLT*) wird individuell für jeden imSLT, basierend auf dem Wartungsintervall, dem letzten Wartungstermin und ggf. durch behälterindividuelles Predictive Maintenance errechnet. Auch der nächste Reinigungstermin kann durch diese Attributverteilung bei festgestellten Verunreinigungen behälterindividuell aktualisiert werden.

Ein Behältertyp besteht wiederum aus n Modultypen. Die Klasse *Modultyp* fasst, analog zur Klasse *Behältertyp*, die Beschreibung der physischen Eigenschaften eines Modultyps zusammen. Darüber hinaus sind für jeden Modultyp die benötigte Produktionszeit und der aktuelle Lagerbestand im Pooling-System als Attribute hinterlegt. Von Bedeutung für die Berechnung der CO₂-Bilanz sind die zwei Attribute, die die Speicherung des CO₂-Ausstoßes für die Herstellung und für das Recycling des jeweiligen Modultyps ermöglichen. Diese werden durch den Hersteller initial je Modultyp ermittelt und können im Anschluss zur systemgestützten Berechnung der behälter- bzw. modulindividuellen CO₂-Bilanz verwendet werden. So kann bereits durch den Service *imSLT-Konfigurator* ein prognostizierter CO₂-Abdruck des konfigurierten Behältertyps angezeigt werden. Die Klasse *Modul*, welche ein physisches Modul beschreibt, erbt alle Attribute der Klasse *Modultyp* und ergänzt diese um die eindeutige ID des Moduls, um das Produktionsdatum (Chargenverfolgung) und um den Hersteller. Diese Attribute werden für die modulspezifische Nachverfolgung der Lagerung und des Einsatzes benötigt. Als Beispiel ist hier die Änderung des Lagerbestands, Attribut der Klasse *Modultyp*, zu nennen. Der Lagerbestand passt sich, über den Service *Pooling-System*, durch die Erfassung der ID des Moduls bei der Montage bzw. der Demontage automatisch an. Bei der Montage wird die ID des Moduls dem jeweiligen imSLT zugeordnet, um so auch die Einsatzdauer eines einzelnen Moduls ableiten zu können. Dementsprechend ist ein imSLT von einem Behältertyp und besteht aus n Modulen, die jeweils einem Modultyp zugeordnet sind.

Der Pooling-Betreiber montiert die imSLTs. Dabei sind seine freien Montage- und Produktionskapazitäten als Attribute der Klasse *PoolingBetreiber* zugeordnet. Diese dienen in Kombination mit der Montagezeit (Klasse *Behältertyp*), der benötigten Produktionszeit und des aktuellen Lagerbestands je Modultyp, der Berechnung eines mögli-

chen Liefertermins der imSLTs. Die Lieferterminberechnung wird sowohl für den Service *Pooling-System*, hier konkret zur Ermöglichung von Ad-hoc-Lieferungen, als auch für den Service *imSLT-Konfigurator* benötigt. Dabei ist für letzteren Service die Datenklasse *imSLTKonfigurator* ausschlaggebend, welche den errechneten Liefertermin als Attribut zugewiesen bekommt. Bei der Konfiguration neuer Behältertypen greift der Konfigurator auf die Attribute der Klasse *Modultyp* zu und bietet dem Anwender die verschiedenen Modultypen als 3D-Darstellung im webbasierten Interface an. Dieser kann somit aus den bestehenden Modultypen beliebig viele neue Behältertypen erstellen und speichern. Auch unfertige Konfigurationen eines imSLT können im Attribut Konfigurationsdaten (frei wählbarer Dateityp) der Klasse *imSLTKonfigurator* gespeichert werden.

Die Klasse *Auftrag*, Grundlage des Service *Auftragsverfolgung*, enthält n imSLTs. Dabei steigt die Anzahl der assoziierten imSLTs mit der Summe an fertig montierten

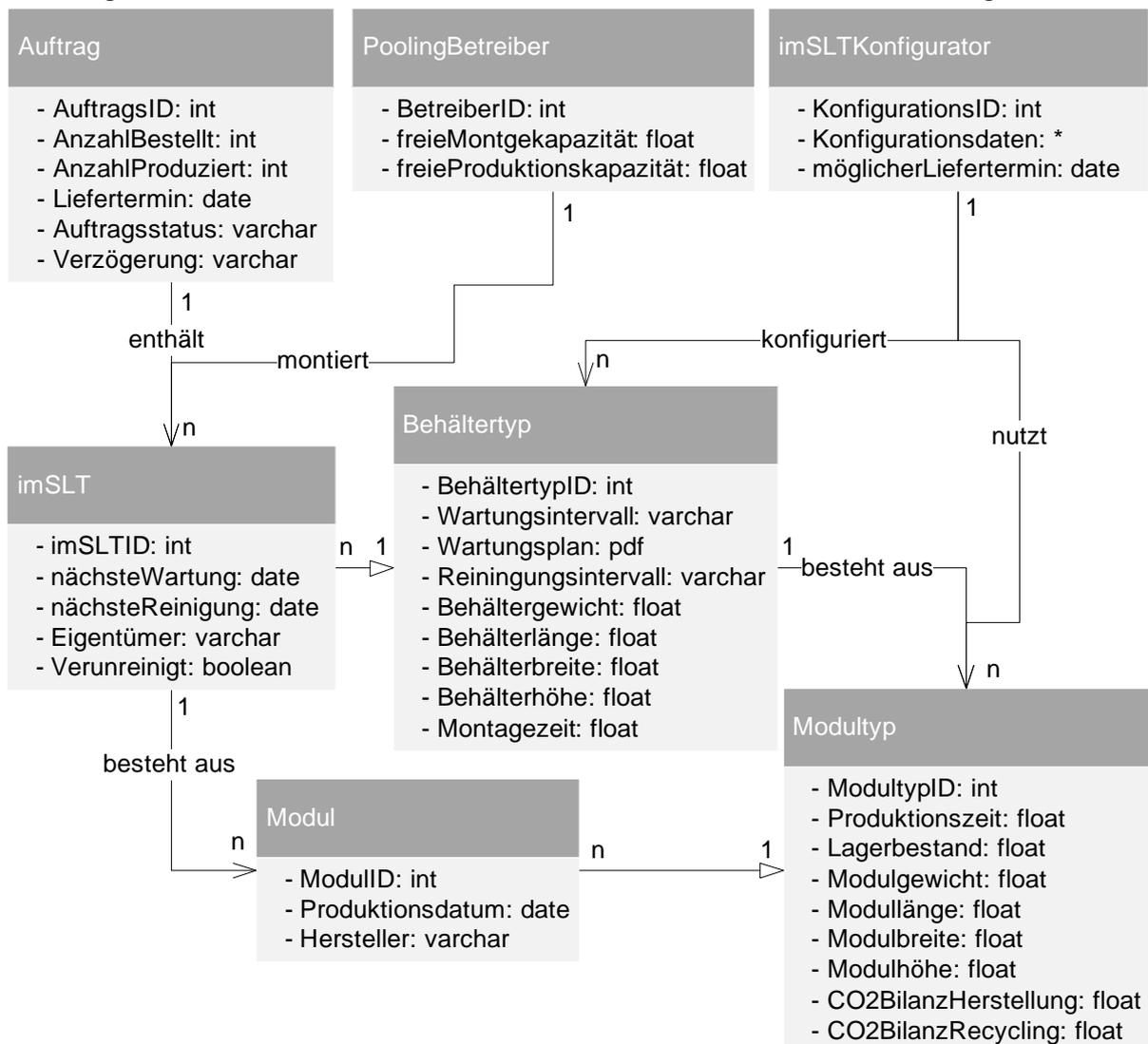


Abbildung 6-20: Detaillierung des Bereichs Herstellung des konzeptionellen Datenmodells

imSLTs (Attribut *AnzahlProduziert*). Zudem werden der Klasse *Auftrag* die bestellte Anzahl von imSLTs, der vereinbarte Liefertermin und der aktuelle Auftragsstatus zugeordnet. Hierbei kann, wie bereits beschrieben, der Auftragsstatus durch eine Benutzereingabe oder automatisch durch das System hinterlegt werden. Vom System wird u. a. mithilfe dieser vier Attribute (*AnzahlProduziert*, *AnzahlBestellt*, *Auftragsstatus* und *Liefertermin*) regelmäßig geprüft, ob eine Verzögerung auftritt. Ist dies der Fall, wird die vom System berechnete Lieferverzögerung (möglicher vs. vereinbarter Liefertermin) der Klasse *Auftrag* als Attribut zugeordnet und kann durch den Anwender mithilfe des Service *Auftragsverfolgung* angezeigt werden.

Einsatz

Die Datenklassen, die sich auf den Einsatz der imSLTs beziehen (in der Gesamtübersicht in Abbildung 6-18 blau umrandet) sind in Abbildung 6-21 detailliert dargestellt. Hier ist die Datenklasse *imSLT* (oben rechts im Bild) der zentrale Baustein, mit dem die meisten anderen Datenklassen in einer direkten oder indirekten Verbindung stehen. Der imSLT transportiert *n* Produkte (Klasse *Produkt*) und ist mit diesen innerhalb des konzeptionellen Datenmodells direkt verbunden. Diese Verbindung sollte bei der Bestückung hergestellt werden. So lassen sich durch die erfassten Daten des imSLT direkte Rückschlüsse auf die geladenen Produkte ziehen. Neben der Verknüpfung mit den Produkten erfolgt auch eine Zuordnung der jeweils aktuellen Lieferinformationen, wie etwa die geplante Lieferzeit, als Teil der Klasse *Lieferung*. Dabei kann ein imSLT immer nur genau einer Lieferung gleichzeitig zugeteilt werden. Für den Service *automatisierte Buchung* sind neben der Datenklasse *Lieferung* noch die Klassen *Buchungsverlauf* und *Buchungspunkt* relevant. Eine Lieferung hat immer genau einen Buchungsverlauf, welcher durch die erfassten Buchungspunkte und den Zeitstempel der Erfassung charakterisiert ist. Ein Buchungsverlauf kann beliebig viele Buchungspunkte beinhalten. Die Attribute eines Buchungspunkts (bspw. Längengrad und Breitengrad) sind fest hinterlegte Parameter, welche durch eine Benutzereingabe des Anwenders bei der Initialisierung des Systems definiert werden. So kann der Anwender bspw. das Eintreffen am Wareneingang, die Einlagerung im Leergutlager oder die Entnahme der Produkte als Buchungspunkte definieren.

Die Klassen *imSLT* und *Kreislauf* spiegeln die Datenmodellierung des physischen Behälterkreislaufs wider, wobei *n* imSLTs Teil eines Kreislaufs sind. Dabei umfasst die Klasse *Kreislauf* neben der systemseitig benötigten ID weitere Attribute, wie u. a. die Namen der teilnehmenden Unternehmen. Ein oder mehrere imSLTs können somit Teil eines Kreislaufs sein, welcher wiederum *n* Buchungspunkte besitzen kann. Darüber hinaus kann der Behälterkreislauf mehrere Bereiche beinhalten. Die Datenklasse *Bereich* definiert durch ihre Attribute *Bereichsform*, *Bereichsgröße* und den *Bereichsmittelpunkt* einen realen, örtlich begrenzten Bereich innerhalb des Kreislaufs. Der Bereich

kann u. a. eine rechteckige Form haben und den Wareneingang, ein Leergutlager oder auch das ganze Werk abdecken. So können alle sich in diesem Bereich befindenden imSLTs zusammengefasst als Bereichsbestand angezeigt werden. Neben der örtlichen Definition des Bereichs kann der Anwender für jeden Bereich obere und untere Grenzwerte für den Behälterbestand und die maximal tolerierte Standzeit eines imSLT angeben. Auf den Kreislauf abgestimmte Grenzwerte ermöglichen so die frühzeitige Auslösung einer Benachrichtigung bei drohenden Unter- oder Überbeständen bzw. eine Überprüfung bei auffälligen Standzeiten.

Positionsdaten des imSLT (oben links in Abbildung 6-21) werden innerhalb des konzeptionellen Datenmodells über die Attribute Breitengrad, Längengrad, Zeitstempel und die ID (geoLogID) des Datensatzes erfasst (Datenklasse *Positionsdaten*). Dabei ist die Beziehung zwischen den Klassen *imSLT* und *Positionsdaten* eine 1:n-Beziehung, da ein imSLT immer wieder neue Positionsdaten erzeugt. Basierend auf deren Zeitstempel wird so der Positionsverlauf des jeweiligen imSLT ermittelt. Ebenso erfolgt mithilfe dieser Daten die Zuordnung der Buchungspunkte (inkl. Zeitstempel). Dementsprechend ermöglicht der Service *automatisierte Buchung* mithilfe der vier Datenklassen *Positionsverlauf*, *Lieferung*, *Buchungsverlauf* und *Buchungspunkt* eine automatische Erfassung, Buchung und Nachverfolgung von Behälterbewegungen innerhalb definierter Prozessschritte. Außerdem kann der Service bei Abweichungen, bspw. von der Lieferzeit oder vom geplanten Buchungsverlauf, den Anwender benachrichtigen.

Neben den Positionsdaten werden durch den imSLT kontinuierlich neue Datensätze zur Umgebung und zum Behälter selbst erfasst. Zur Speicherung dieser Daten ist die Datenklasse *Zustandsgrößen* mit den benötigten Attributen ausgestattet. Als beispielhafte Attribute dienen hier der Batteriestatus, die Temperatur, die Luftfeuchtigkeit, der Füllstand, die Beleuchtungsstärke oder die Beschleunigungen in die drei Raumrichtungen. Je nach verbauten Sensoren sind weitere Attribute für zusätzliche Zustandsgrößen denkbar. Jeder Datensatz ist mit einem Zeitstempel und einer eindeutigen ID versehen. So kann dieser später innerhalb der Services für die Darstellung von zeitlichen Verläufen genutzt werden. Bzgl. der erfassten Zustandsgrößen sind, wie bereits beim Service *Zustandsüberwachung* beschrieben, verschiedene Auswertungen möglich. Es können mehrere Zustandsgrößen, wie etwa eine Kombination aus Temperatur und Luftfeuchtigkeit, für die Analyse zusammengefasst werden, um Maßnahmen, wie etwa für die Lagerung von empfindlichen Lederoberflächen, ergreifen zu können, bevor die Produkte Schaden nehmen. Ein weiteres Beispiel ist die Erkennung von Erschütterungen des imSLT, welche durch die kombinierte Auswertung der Beschleunigungen in die drei Raumrichtungen möglich ist. Auch diese kombinierten Zustandsgrößen können als Attribut in der Datenklasse *Zustandsgrößen* hinterlegt werden.

Der Service *Zustandsüberwachung* benachrichtigt den Anwender bei einer erkannten Grenzwertüberschreitung. Dazu benötigt der Service neben der Klasse *Zustandsgrößen* die zwei Datenklassen *Grenzwert* und *Benachrichtigung*. In der Klasse *Grenzwert*

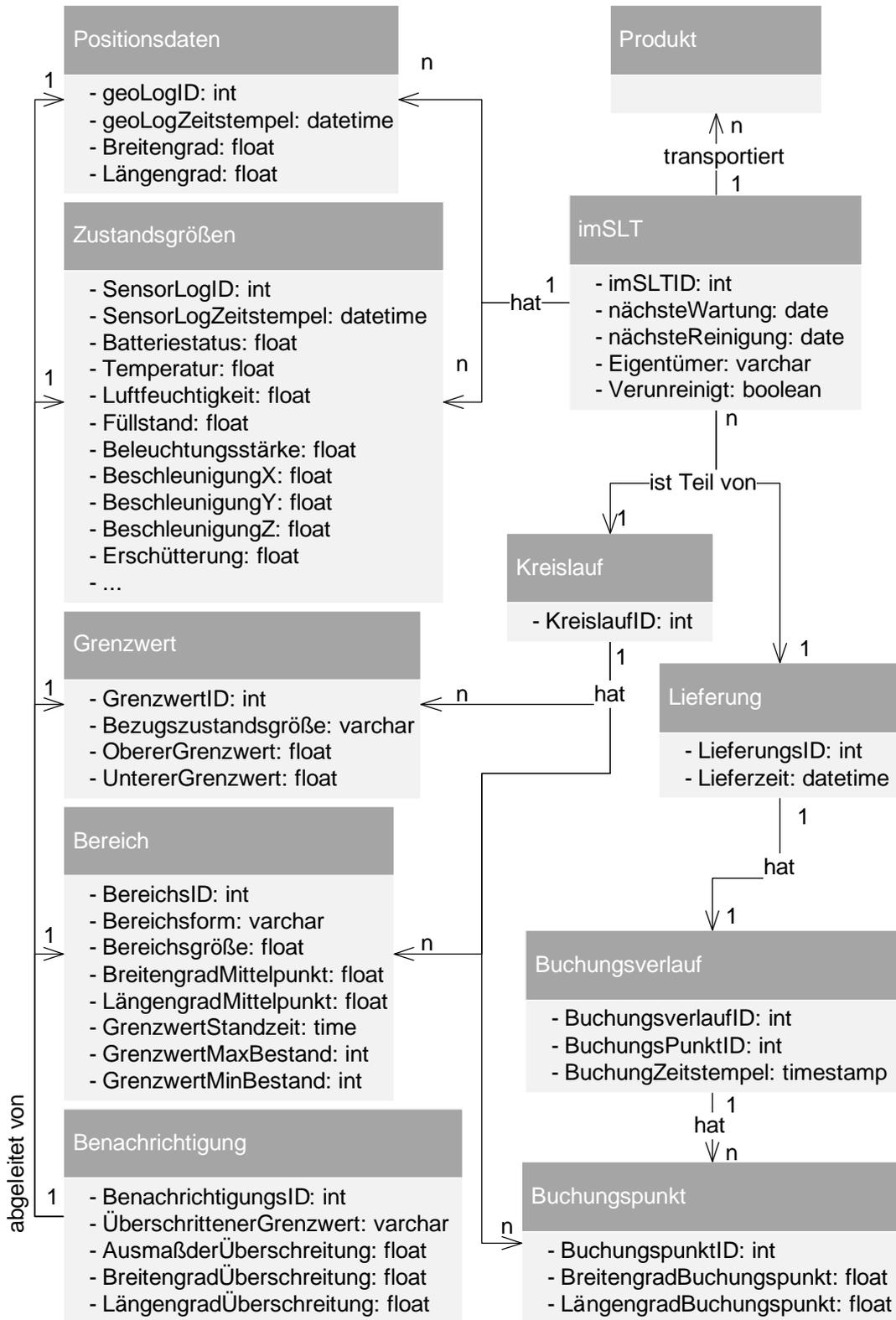


Abbildung 6-21: Detaillierte Ansicht des Bereichs Einsatz (blau) im konzeptionellen Datenmodell

werden durch den Anwender die jeweiligen oberen und unteren Grenzwerte je Zustandsgröße hinterlegt. Dabei kann ein Kreislauf beliebig viele Grenzwertdefinitionen besitzen, welche sich, basierend auf den zu transportierenden Produkttypen in den jeweiligen Behälterkreisläufen (bspw. Glasscheiben oder sensible Oberflächen), unterscheiden können. Die definierten Grenzwerte werden durch den Service *Zustandsüberwachung* mit dem jeweils aktuellsten Datensatz der Klasse *Zustandsgrößen* verglichen. Bei einer Grenzwertüberschreitung wird eine Benachrichtigung ausgelöst. Die Datenklasse *Benachrichtigung* fasst den Namen des überschrittenen Grenzwerts, das Ausmaß und die Position der Überschreitung mithilfe seiner Attribute zusammen. Die zugehörigen Positionsdaten werden anhand des Zeitstempels der Grenzwertüberschreitung zugeordnet. Pro Grenzwertüberschreitung wird genau eine Benachrichtigung verschickt. Demzufolge können Benachrichtigungsverläufe für eine zeitversetzte Auswertung der Geschehnisse zu Rate gezogen werden. Bzgl. der Auslösung und Speicherung von Benachrichtigungen verfährt der Service *digitales Behältermanagement* analog zum Service *Zustandsüberwachung*. Die zugehörigen Grenzwerte sind in der Klasse *Bereiche* abgelegt.

Berichte

Der dritte Bereich im konzeptionellen Datenmodell (siehe Abbildung 6-18, grüne Umrandung) fokussiert sich auf die digitale Berichtserstellung und ist in Abbildung 6-22 detailliert dargestellt. Dabei ist die übergeordnete Datenklasse *Bericht* durch das Attribut *BerichtsID* eindeutig einem imSLT zuordenbar. Diese Klasse beinhaltet darüber hinaus Attribute für das Datum und den Verfasser des Berichts, welche automatisiert erfasst werden. Zudem kann der Anwender im Bericht konkretisieren, welche Maßnahmen genau am imSLT durchgeführt und wo dabei gearbeitet wurde (Attribute *WasWurdeGemacht* und *WoWurdeGearbeitet*). Diese beiden Attribute können bei einer späteren Umsetzung bspw. als Dropdown-Menü ausgeführt werden, um die Auswahl einzuschränken und so Auswertungen zu erleichtern. Ergänzend wird durch den Anwender für den Bericht ein vorgegebenes Berichtsblatt (*BerichtPDF*) ausgefüllt und bei Bedarf ein Bild hinterlegt. Das Berichtsblatt unterscheidet sich je nach Berichtsart (Reinigungs-, Wartungs-, Reparatur-, Schadens- und Recyclingbericht) und hilft dem Anwender anhand einer vorgegebenen Struktur, die wichtigsten Informationen kompakt anzugeben. Im Idealfall kann das Berichtsblatt direkt vor Ort am imSLT mithilfe eines mobilen Endgeräts ausgefüllt werden. Dabei ist anzumerken, dass der Reinigungsbericht meist durch ein automatisiertes System, bspw. eine Waschstraße, ausgefüllt und direkt im System hinterlegt wird. Der Schadens-, Wartungs- und Reparaturbericht hingegen wird in der Regel manuell durch einen Mitarbeiter erfasst.

Die beschriebenen Attribute werden von der Klasse *Bericht* an die untergeordneten Klassen, *Reinigungsbericht*, *Wartungsbericht*, *Reparaturbericht*, *Schadensbericht* und

Recyclingbericht vererbt. Die Klasse *Schadensbericht* beinhaltet außerdem ein explizites Attribut, mit dem der Anwender den Schaden kategorisieren kann. Es zielt konkret auf die anschließende automatisierte Auswertung von auftretenden Beschädigungen ab. Einem imSLT können n Berichte, konkret n Reinigungs-, Wartungs-, Reparatur- und Schadensberichte, zugeordnet werden. Hervorzuheben ist, dass sich der Recyclingbericht auf das Recycling des einzelnen Moduls bezieht und dem imSLT nicht direkt zugeordnet wird. Deshalb steht der Recyclingbericht in keiner direkten Beziehung zum imSLT, sondern nur zur übergeordneten Klasse *Bericht* (Vererbung). Innerhalb des Recyclingberichts ist neben den vererbten Attributen auch die CO₂-Bilanz des Moduls ein wichtiger Bestandteil. Durch den Recyclingbericht werden die Recyclingart und der konkrete CO₂-Ausstoß des tatsächlich durchgeführten Recyclingprozesses dokumentiert. Die Dokumentation kann vor allem für spätere Auswertungen genutzt werden, um einen belastbaren CO₂-Footprint des imSLT anzugeben. Innerhalb des Datenmodells ist definiert, dass ein Modul genau einen Recyclingbericht besitzt.

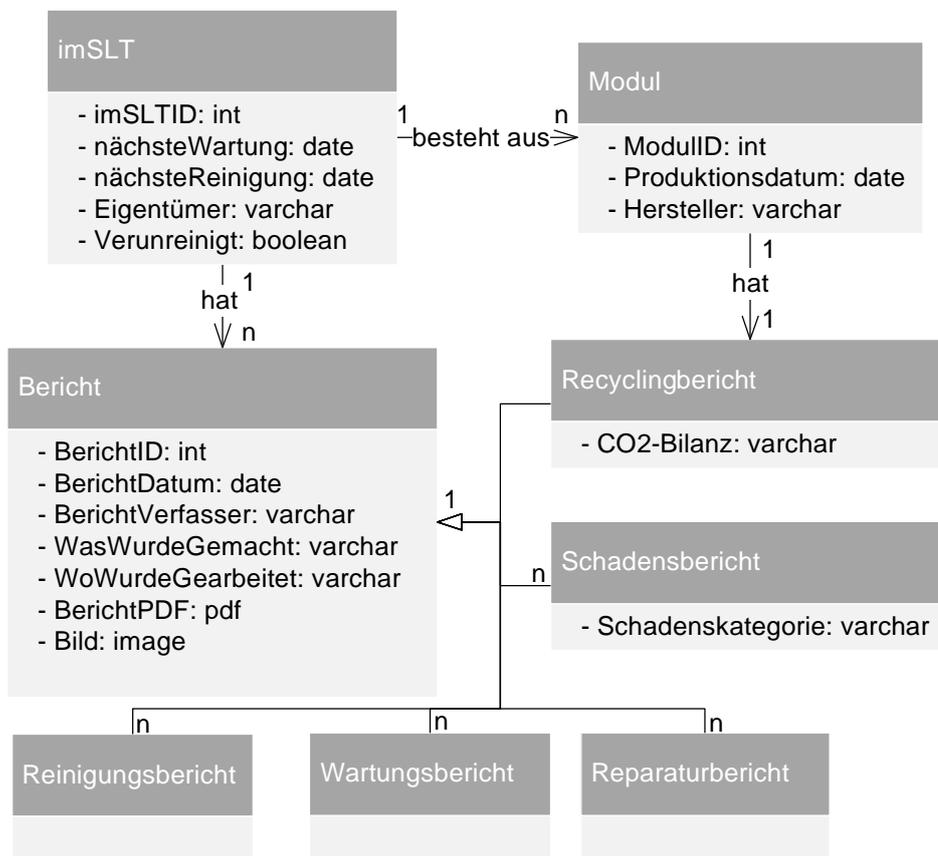


Abbildung 6-22: Detaillierung des grünen Bereichs (Berichte) im konzeptionellen Datenmodell

6.4 Aufbau der Fünf-Schichten-IoT-Architektur

Basierend auf den Ergebnissen der vorhergehenden Abschnitte wird in den folgenden Unterabschnitten die Fünf-Schichten-IoT-Architektur erstellt. Das Ziel der Fünf-Schichten-IoT-Architektur ist es, die Potenziale von intelligenten, modularen Sonderladungsträgern zu erschließen und sie für die beteiligten Unternehmen nutzbar zu machen. So werden die erarbeiteten Funktionen in Form eines Service-Systems unternehmensübergreifend bereitgestellt. Dieses Service-System, welches zur Eliminierung der identifizierten Schwachstellen dient, fasst den physischen imSLT sowie die konzipierten Services zusammen. Es bietet den Teilnehmern des Behälterkreislaufs, vom Hersteller über den Zulieferer zum OEM, die Möglichkeit, die Services flexibel in Anspruch zu nehmen.

Die fünf Schichten der Architektur (siehe Abbildung 6-23) ergeben sich aus den identifizierten Anforderungen (siehe Abschnitt 5.3), den vier erarbeiteten Kategorien an Teilfunktionen (siehe Unterabschnitt 6.2.1), dem konzeptionellen Datenmodell und den grundlegenden Strukturen des Service-Systems sowie dessen Ressourcen, Komponenten und deren Beziehungen. Dabei orientieren sich die einzelnen Schichten der Architektur an den *Layers* von RAMI4.0 (siehe Abschnitt 3.3). Es ist durch die erarbeitete Architektur möglich, Funktionsumfänge und Daten unternehmensübergreifend zur Verfügung zu stellen und das Zusammenwirken von Akteuren und Ressourcen zur Erbringung der Services zu regeln. Teile der Fünf-Schichten-IoT-Architektur wurden bereits in [Zei-2019a] und [Zei-2020c] veröffentlicht. In den folgenden Unterabschnitten werden auf dieser Grundlage der Aufbau und Workflow jeder Schicht genauer beschrieben. Begonnen wird dabei mit der untersten Schicht, *intelligente Objekte*, von der aus ausgehend die Daten der imSLTs, über die *Kommunikations-*, die *Cloud & Applikations-*, die *Client-* und die *Anwenderschicht*, Schritt für Schritt weiterverarbeitet und aufbereitet werden. Die in den folgenden Unterabschnitten gezeigten Teilaus-

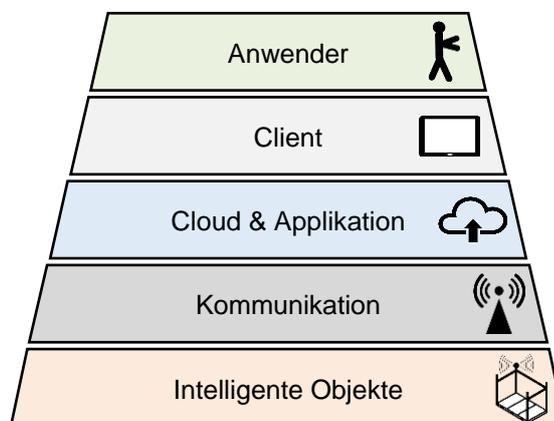


Abbildung 6-23: Schichtaufbau der Fünf-Schichten-IoT-Architektur [in Anlehnung an Zei-2019a]

schnitte aus der Fünf-Schichten-IoT-Architektur fokussieren den Kommunikationsablauf und den zugehörigen Datenfluss zwischen und innerhalb der einzelnen Schichten. Dabei wird die erarbeitete Systemarchitektur, deren Erstellung durch eine Studienarbeit (vgl. [fml-2019b]) unterstützt wurde, direkt in den einzelnen Schichten mit dargestellt.

6.4.1 Schicht 1 – Intelligente Objekte

Innerhalb der untersten Schicht mit dem Namen *intelligente Objekte* (siehe Abbildung 6-24) befindet sich neben den imSLTs die gesamte Hardwareinfrastruktur (u. a. zur Identifikation und Kommunikation), um den Betrieb des Service-Systems zu ermöglichen. Ebenso werden dieser Schicht alle Funktionsumfänge, denen physische Tätigkeiten zugrunde liegen (im Funktionsmodell pastellorange gefärbt), zugeordnet. So zählen die physische Durchführung von Reparaturarbeiten (F5.2.2) und das Vorhalten von Modulbeständen (F1.1.1), die den physischen Betrieb des Service-Systems durch ihren Funktionsumfang aufrechterhalten, zu dieser Schicht (weitere Funktionsumfänge siehe Unterabschnitt 6.2.1).

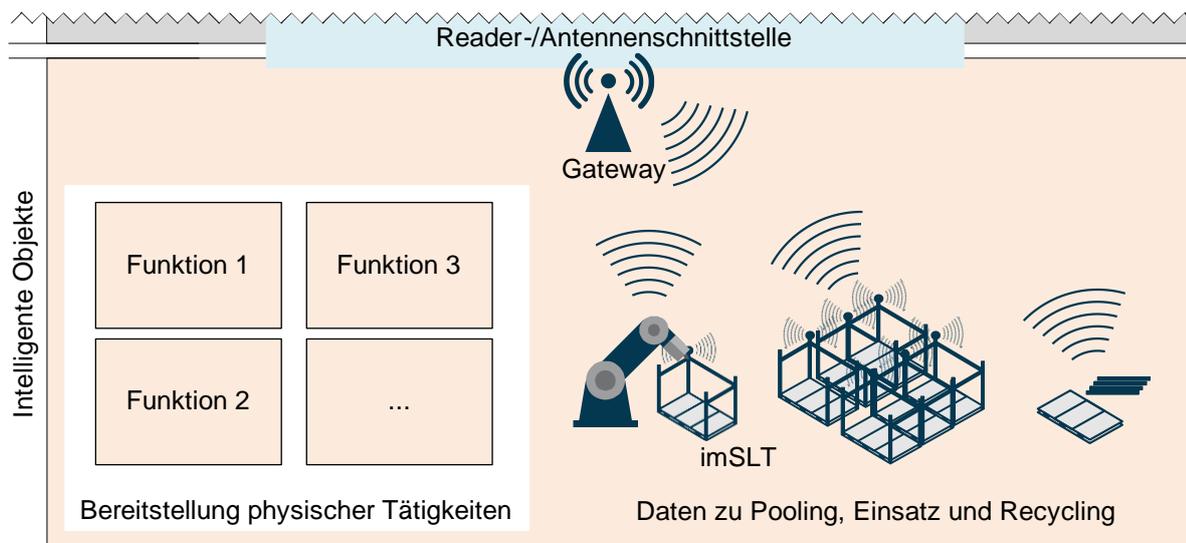


Abbildung 6-24: Detaildarstellung der Schicht intelligente Objekte

Um den vollen Funktionsumfang der Services zu ermöglichen, ist der imSLT, als Teil der Schicht *intelligente Objekte*, mit einer eindeutigen ID markiert und aus wiederverwendbaren Modulen montiert. Hier kann zwischen Modulen wie Steher, Bodenplatte, Seitenverkleidung, Querstreben, Innenleben und IoT-Modul unterschieden werden (siehe Abbildung 6-25). Die genaue Ausgestaltung des modularen Baukastens für imSLTs ist nicht Gegenstand dieser Arbeit und kann in [Mei-2018] nachvollzogen werden.

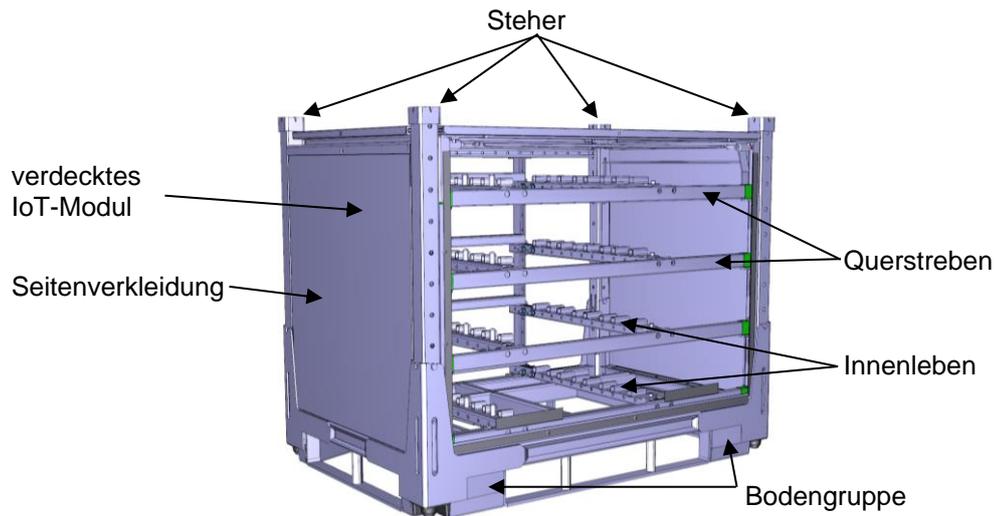


Abbildung 6-25: Beispielhafte Modulaufteilung eines imSLT

Jedes Modul ist mit einer eindeutigen ID ausgestattet, die, wie bereits beschrieben, u. a. für die Reparaturhistorie, die Chargenverfolgung, das Recycling, die Lager- und die Verwendungshistorie benutzt wird. Die moduleigene ID sollte so angebracht werden, dass diese nach der vollständigen Montage des imSLT nicht mehr erfasst werden kann. Sonst besteht die Gefahr, dass ein Mitarbeiter während des Einsatzes im Behälterkreislauf die Modul-ID mit der ID des imSLT verwechselt. In der untersten Schicht der Fünf-Schichten-IoT-Architektur wird zudem der gesamte Lebenszyklus eines Moduls von der Herstellung, über die Lagerung und mehrere Einsatzzyklen bis hin zum Recycling abgebildet. Alle Lebenszyklusphasen werden digital dokumentiert und anhand der ID dem jeweiligen Modul zugeordnet.

Für die technische Umsetzung der eindeutigen Modul-ID bietet sich der Barcode oder QR-Code an, da beide ohne aktive Energieversorgung auskommen, kostengünstig sind und durch eine sinnvolle Positionierung auf dem Modul bei vollständiger Montage optisch verdeckt werden können. So kann es zu keiner Verwechslung der Behälter-ID und der Modul-ID kommen. Ein weiterer Vorteil des Barcodes oder QR-Codes ist, dass diese beim Montage- oder Reparaturprozess von einer Vielzahl von Geräten (z. B. eine Tablet-Kamera) erfasst und ausgelesen werden können. So können auch kleinere Reparaturdienstleister ohne teure Hardwareausstattung, durch die Nutzung von internetfähigen, mobilen Endgeräten am Service-System teilnehmen.

Für die Realisierung der erstellten datenbasierten Funktionsumfänge ist jeder imSLT darüber hinaus mit einem IoT-Modul ausgestattet. Dieses muss sowohl eine intervallbasierte (z. B. für den kontinuierlichen Positionsverlauf) als auch eine ereignisbasierte (bei starken Erschütterungen) Kommunikation und Datenübertragung ermöglichen.

Die ereignisbasierte Übertragung muss durch die Veränderung von Standorten, Sensorwerten, Systemvorgaben oder durch den Nutzer selbst ausgelöst werden können. Von Bedeutung ist, dass das Modul einen geringen Stromverbrauch pro gesendeter Nachricht gewährleistet und nach Möglichkeit große Reichweiten der Datenübertragung verwirklichen sollte. In Anbetracht der Tatsache, dass die gesamte Nutzungsdauer eines Sonderladungsträgers aktuell in der Regel mehrere Jahre beträgt, können so häufige Batteriewechsel vermieden und geringere Infrastrukturaufwände (u. a. weniger Gateways zur Abdeckung eines Werksgeländes) realisiert werden. Auch sollte das IoT-Modul die Lokalisierung des imSLT ermöglichen. Wie bereits erwähnt, kann dies über GPS, POI-Lokalisierung, ereignisbasiertes Tracking (bspw. mit RFID) oder über eine andere Lokalisierungstechnologie erfolgen. Die benötigte Genauigkeit der Positionsbestimmung (Lokalisierungsgenauigkeit und Übertragungshäufigkeit) sollte dabei immer in Abhängigkeit vom jeweiligen Behälterkreislauf bestimmt werden, um das Modul stromsparend auslegen zu können.

In Bezug auf den Service *Zustandsüberwachung* sind als weiterer Bestandteil des IoT-Moduls verschiedene Sensoren erforderlich. Hier kann die Erfassung von Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Beleuchtungsstärke, Neigung und von Beschleunigungen eine hilfreiche Datenbasis zur Auswertung der Umgebungsbedingungen, Transportvibrationen und Aufprallereignissen liefern. Auch die Messung des Füllstands kann mithilfe von Sensoren oder über eine Prozesslogik erfolgen. Der Einsatz der Sensorik sollte dabei auf den jeweiligen Behälterkreislauf und auf das zu transportierende Produkt abgestimmt werden. Bspw. ist der Einsatz einer Aufpralldetektion mit der Messung von Neigungen und Beschleunigungen für den Transport von Glasscheiben oder sensiblen Instrumententafeln sinnvoll, wohingegen beim Reifentransport auf diese Sensorik verzichtet werden kann.

Die eindeutige ID des imSLT muss neben einer Übermittlung durch das IoT-Modul auch durch eine zweite Identifikationstechnologie direkt am imSLT auslesbar sein. Diese Redundanz dient der Sicherheit gegenüber Manipulation und Beschädigung des IoT-Moduls und bringt weitere Vorteile mit sich: Wird der imSLT neben dem eigentlichen IoT-Modul bspw. mit einem QR-Code ausgerüstet, kann dieser direkt vor Ort zur automatisierten Ermittlung der Behälter-ID verwendet werden. So können Mitarbeiter mit einem einfachen Smartphone erkannte Schäden oder Verunreinigungen dokumentieren und über den QR-Code dem jeweiligen Ladungsträger zuordnen.

Grundsätzlich muss das IoT-Modul, unabhängig von der Kommunikationstechnologie, die ID des imSLT und alle erfassten Positions- und Sensordaten an das nächstgelegene Gateway übertragen können. Dabei sollte bzgl. der Informationssicherheit in Betracht gezogen werden, eine redundante, verschlüsselte Datenübertragung von Seiten

des IoT-Moduls zu implementieren. Generell ist auch der Einsatz mehrerer, parallel eingesetzter Kommunikationstechnologien denkbar. So kann, bspw. durch den gleichzeitigen Einsatz von LPWAN und RFID, auch bei Unternehmen mit unterschiedlichen IuK-Infrastrukturen eine automatisierte Erfassung der Daten gewährleistet werden.

Das physische Gateway, als Teil der Hardwareinfrastruktur, ist ein weiterer Bestandteil der untersten Schicht. Es leitet neben der eigenen Position und Gateway-ID die übertragenen ID, Positions- und Sensordaten der imSLTs an die *Cloud & Applikationsschicht* weiter. Die Informationsverarbeitung und der geforderte Kommunikationsablauf innerhalb des Gateways werden dabei durch die zweite Schicht der Fünf-Schichten-IoT-Architektur definiert (siehe Unterabschnitt 6.4.2). Die physischen Gateways müssen, abhängig von der gewählten Kommunikationstechnologie, an verschiedenen Punkten in den Werken und auf dem Transportweg zwischen den Unternehmen installiert werden. Hier sollte auf eine robuste Infrastruktur, also den redundanten Empfang einer Nachricht an verschiedenen Infrastrukturelementen (z. B. an zwei verschiedenen Gateways), geachtet werden. Nur so können Übertragungsfehler und Verluste von Nachrichten vermieden werden.

6.4.2 Schicht 2 – Kommunikation

Die zweite Schicht basiert auf der EPCIS-Architektur (vgl. [GS1-2015]) und regelt den Kommunikationsablauf zwischen den imSLTs und der *Cloud & Applikationsschicht*. Ziel des Einsatzes von EPCIS innerhalb des Service-Systems ist es, durch die Verwendung des standardisierten Übermittlungsprotokolls und Nachrichtenvokabulars, ein unternehmensübergreifend eindeutiges Verständnis der erzeugten Daten und eine einfache Integration weiterer Teilnehmer zu ermöglichen.

Dem standardisierten Übermittlungsprotokoll folgend, wird deshalb der Inhalt einer Nachricht bzw. eines sogenannten EPCIS-Events, welches an der *Cloud & Applikationsschicht* ankommt, anhand von vier Dimensionen beschrieben: was, wann, wo und warum (vgl. [GS1-2016]). „Was“ legt fest, um welches Objekt es sich handelt. Hier wird die ID des imSLT verwendet. Mit „wann“ und „wo“ werden der Zeitpunkt und der physische Ort des Events identifiziert. Über die Dimension "warum" werden der Grund der Übertragung (bspw. die Ankunft im Wareneingang) und konkrete Werte (z. B. der Sensoren) übermittelt. Für die inhaltliche Beschreibung der vier Dimensionen wird das durch GS1 standardisierte Vokabular, das sogenannte Core Business Vocabulary (vgl. [GS1-2016]), verwendet. Das Core Business Vocabulary für die Übermittlung von Qualitäts- und Sensordaten ist zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit noch nicht finalisiert. Allerdings hat sich hier bereits eine Arbeitsgruppe um GS1 formiert, die den Standardisierungsprozess vorantreibt (vgl. [que-2020]).

Der konkrete Ablauf innerhalb der Fünf-Schichten-IoT-Architektur zur Umwandlung der Daten eines imSLT in ein EPCIS-Event ist in Abbildung 6-26 dargestellt und wird im Folgenden beschrieben. Die durch den imSLT gesendeten Daten, der sogenannte Payload (bspw. die ID, Positions- oder Zustandsdaten), werden vom Gateway, genau genommen von dessen Antennenschnittstelle, empfangen. Dabei kann die Datenübertragung über diverse Technologien, wie LPWAN, RFID oder einen Barcodescanner, erfolgen. Die von der Antennenschnittstelle registrierten Datenpakete werden an die *Data Capture Application* (in Abbildung 6-26 rot) weitergeleitet. Dabei verfährt die *Data Capture Application* in drei Schritten: Im ersten Schritt durchlaufen die empfangenen Daten einen Filter- und Aggregationsprozess, bei dem mehrfach empfangene, identische Datensätze (Redundanz aufgrund von Übertragungssicherheit) gefiltert oder Teilübertragungen zusammengesetzt werden. Anschließend akkumuliert der Algorithmus des *Data Capture Workflow* die empfangenen Payloads, überprüft diese auf Fehler und Plausibilität und fügt zusätzliche Informationen, z. B. die ID und Position des verarbeitenden Gateways oder Readers, hinzu. Nach Abschluss des *Data Capture Workflow* werden die Daten an das *EPCIS Capture Interface* übergeben.

Das *EPCIS Capture Interface* realisiert die über alle Technologien einheitliche und standardisierte Schnittstelle zur *Cloud & Applikationsschicht*. Dafür werden die empfangenen ID, Positions- und Zustandsdaten des imSLT, unter Verwendung des standardisierten Übermittlungsprotokolls und Nachrichtenvokabulars, in einen nach dem EPCIS-Standard aufgebauten Datensatz (bspw. im XML-Format) umgewandelt. Die

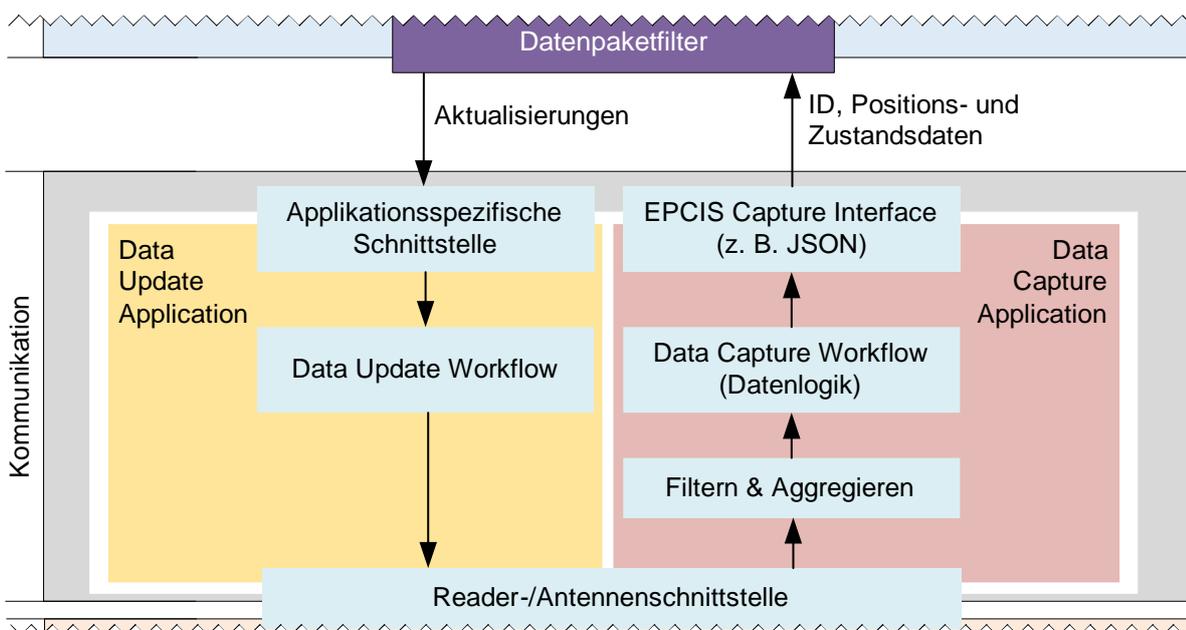


Abbildung 6-26: Kommunikationsablauf in der zweiten Schicht der Fünf-Schichten-IoT-Architektur [in Anlehnung an Zei-2019a]

Daten werden anschließend, über alle Gateways einheitlich, an die *Cloud & Applikationsschicht* übermittelt. Bei dieser Datenübertragung sind gängige Transportprotokolle (bspw. MQTT) und Verschlüsselungstechnologien, wie Transport Layer Security (TLS, vgl. [Fis-2000, S. 241ff.]), einzusetzen. Diese Richtung des Datenflusses vom imSLT zur *Cloud & Applikationsschicht* wird auch als Uplink bezeichnet.

Der Vorgang, bei dem die Daten von der *Cloud & Applikationsschicht*, wie etwa Aktualisierungen für das IoT-Modul, über die *Kommunikationsschicht* Richtung imSLT übertragen werden, wird als Downlink bezeichnet. Solche Aktualisierungen können die Veränderung des Sendeintervalls oder die Festlegung von Grenzwerten für eine ereignisbasierte Nachrichtenübertragung sein. Bei einem Downlink wird der Datensatz aus der *Cloud & Applikationsschicht* an die *Date Update Application* übermittelt und dort von der applikationsspezifischen Schnittstelle empfangen. Diese decodiert die Informationen und übergibt die Daten an den *Update Workflow*. Der *Update Workflow* wandelt die Daten, entsprechend der eingesetzten Kommunikationstechnologie (bspw. LWPAN), in eine durch das IoT-Modul verständliche Anweisung um. Diese wird anschließend über die Antennenschnittstelle an den imSLT übertragen.

Der Hauptteil der Datenverarbeitung ist in der *Cloud & Applikationsschicht* (siehe Unterabschnitt 6.4.3) angesiedelt. Dies hat den Vorteil, dass sowohl IoT-Module als auch Gateways einfacher und dadurch stromsparender gestaltet werden können. Die einzige Funktionalität, die ein Gateway unabhängig von der eingesetzten Kommunikationstechnologie erfüllen muss, ist die systemkonforme, standardisierte Umwandlung und Weiterleitung der empfangenen Nachrichten an die *Cloud & Applikationsschicht*. Dies erlaubt eine Integration von unterschiedlichen Kommunikationstechnologien, intelligenten Objekten und Herstellern in das Service-System, solange jene den geforderten standardisierten Nachrichtenaufbau ermöglichen.

6.4.3 Schicht 3 – Cloud & Applikation

Basierend auf dem Funktions- und konzeptionellen Datenmodell ist die *Cloud & Applikationsschicht* mit einer zentralen Datenhaltung und -verarbeitung ausgeführt (siehe Abbildung 6-27). So können die konzipierten Services mit den sich überschneidenden Funktionsumfängen und Datenquellen ohne komplexe systemübergreifende Kommunikationsabläufe realisiert werden. Dies ist vor allem bei einer wachsenden Anzahl der Teilnehmer im Service-System oder bei einer Erweiterung um neue Services von Bedeutung.

Obwohl alle Komponenten und Funktionalitäten der *Cloud & Applikationsschicht* auch lokal gehostet werden können, bietet sich für die Bereitstellung des unternehmensübergreifenden Service-Systems eine cloudbasierte Plattform an. Von den in Unterabschnitt 2.3.2 beschriebenen Vorteilen des Cloud-Computings, sind besonders die einfache Skalierbarkeit der genutzten virtuellen Ressourcen (Datenbanken und Rechenkapazitäten) und die unternehmensübergreifende Nutzung und Erreichbarkeit des Service-Systems relevant. So ist eine Erweiterung des Service-Systems um weitere Services, imSLTs oder Teilnehmer aufwandsarm möglich und der Zugriff auf das System über standardisierte Protokolle und Mechanismen gesichert. Dadurch wird ein einfacher, standortunabhängiger Zugriff über das Internet mit gängigen mobilen Endgeräten wie Smartphones, Tablets oder Laptops möglich. Auch werden vom Cloudbetreiber die rechtlichen Vorgaben und ein entsprechendes Sicherheitskonzept für den unternehmensübergreifenden Einsatz berücksichtigt. Dabei fällt die Verantwortung für Backup-Regelungen, Verschlüsselungsverfahren, redundante ausfallsichere Hardware, Firewalls und weitere sicherheitsrelevante Themen dem Cloudbetreiber zu. Der Argumentation folgend kann mithilfe des Cloud-Computings eine funktionsfähige *Cloud & Applikationsschicht*, trotz fehlender Plattform-Hosting-Expertise der Teilnehmer des Behälterkreislaufs (von OEMs bis hin zu kleineren Reparaturdienstleistern) realisiert werden.

Der in Abbildung 6-27 dargestellte Kommunikationsablauf in der *Cloud & Applikationsschicht*, ausgehend von den ankommenden ID, Positions- und Zustandsdaten der *Kommunikationsschicht*, gestaltet sich wie folgt.

Alle an die *Cloud & Applikationsschicht* übertragenen Daten sowie alle eingehenden Anfragen werden von einem Datenpaketfilter überprüft und gefiltert. Nur Datenpakete oder Anfragen von vertrauenswürdigen Quellen werden akzeptiert. Dieser Sicherheitsmechanismus verhindert einen unrechtmäßigen Zugriff von außen und erlaubt eine sichere Kommunikation mit den anderen Schichten der Architektur. Das aus der *Kommunikationsschicht* kommende Datenpaket (bspw. mit ID, Positions- und Sensordaten) wird nach dem Datenpaketfilter direkt in ein EPCIS-Repository abgelegt. In dieser Datenbank werden alle eingehenden Datensätze in ihrer Rohform gespeichert, damit sie bei Änderungen und Erweiterungen der Services in unverarbeiteter Form erneut eingespeist werden können. Wird z. B. eine Berechnungslogik aufgrund eines Fehlers verändert, kann diese erneut auf die originalen Rohdaten angewendet werden. So bekommt der Anwender aktualisierte Ergebnisse auch von zurückliegenden Datensätzen.

Zugleich werden alle eingehenden Datenpakete aus der *Kommunikationsschicht* direkt an die Datenverarbeitung übergeben. Dort werden die Daten von verschiedenen

Microservices verarbeitet, analysiert und so u. a. kombinierte Zustandsgrößen berechnet oder Grenzwerte überwacht. Die Microservices entsprechen der softwaretechnischen Implementierung der hellblau markierten Funktionen aus dem Funktionsmodell (Unterabschnitt 6.2.1, Systemoperationen). Sie sind analog dem SOA-Paradigma umzusetzen und bilden die Prozesslogik und Verarbeitungsalgorithmen für eingehende Daten oder Benutzeranfragen ab. Dementsprechend können dem Nutzer, durch die Kooperation von mehreren unabhängigen Microservices, die in Unterabschnitt 6.2.1 beschriebenen übergeordneten Services bereitgestellt werden. So wird die Funktion zur Ermittlung des aktuellen Standorts eines imSLT (F10.1.1.1) von mehreren anderen Funktionen wie F11.2.1 (Anzahl der imSLTs je Bereich ermitteln) oder F12.1.1.1 (Buchungsverlauf aktualisieren) verwendet, um die übergeordneten Services, in diesem Beispiel das *digitale Behältermanagement* und die *automatisierte Buchung*, zu realisieren. Dieser Ansatz der Datenverarbeitung bietet sich aufgrund der Vielzahl von Abhängigkeiten und redundanten Funktionsumfängen innerhalb der einzelnen Services

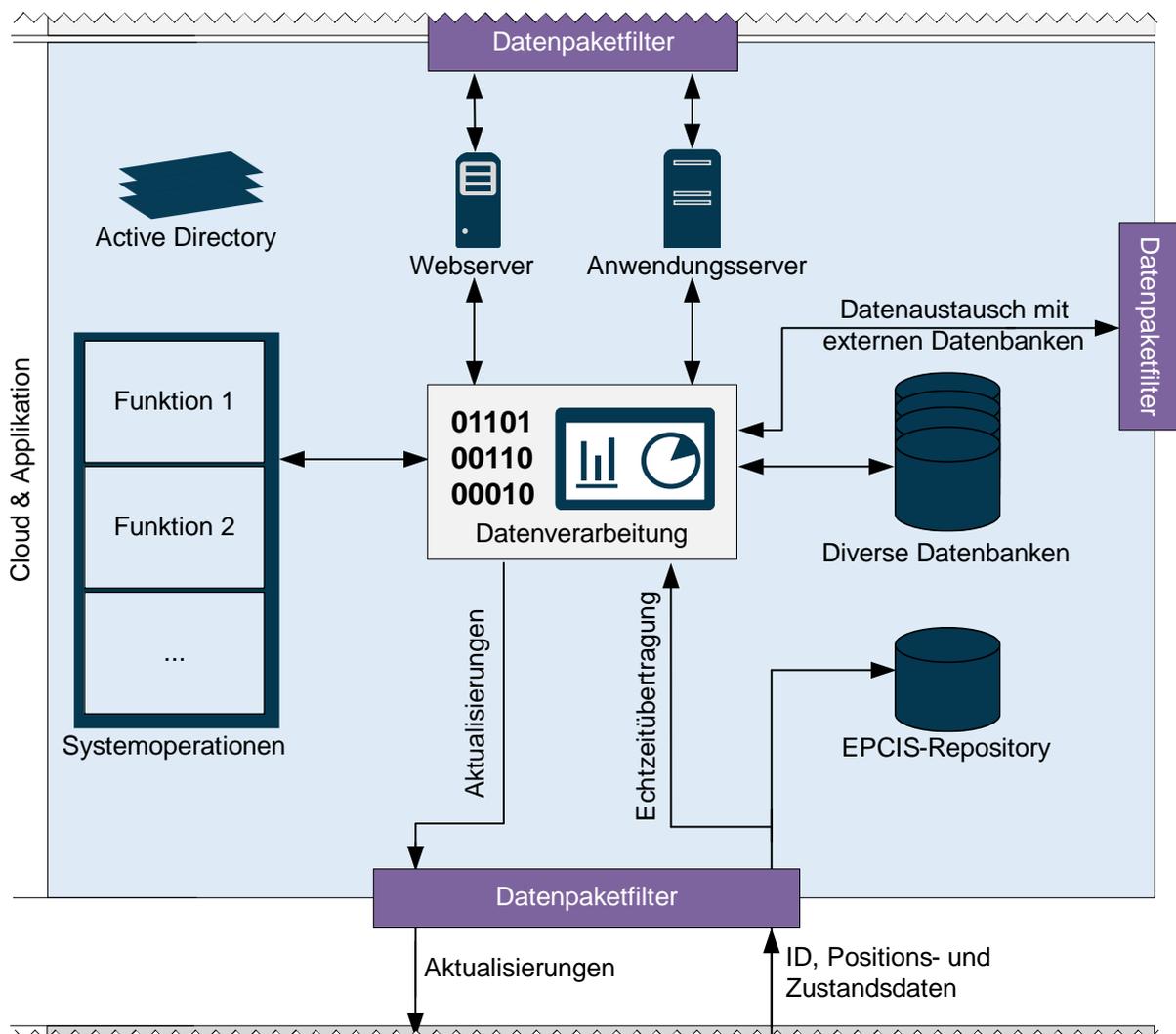


Abbildung 6-27: Cloud & Applikationsschicht der Fünf-Schichten-IoT-Architektur [in Anlehnung an Zei-2019a]

an. Nach der Verarbeitung und Anreicherung der Datensätze werden diese durch die entsprechenden Microservices (bspw. Funktion F11.1.1: Daten des Behältermanagements verwalten) in den jeweiligen Datenbanken abgelegt. Die Struktur der Datenbanken baut dabei auf dem in Abschnitt 6.3 präsentierten konzeptionellen Datenmodell auf und ermöglicht die Speicherung und den Zugriff auf die benötigten Datensätze. Darüber hinaus müssen weitere Kapazitäten zur Speicherung von zusätzlich anfallenden Daten, u. a. User-Aktivitäten und administrativen Daten, vorgesehen werden.

Eine Anfrage vom Anwender, wie etwa die Anzeige des aktuellen Temperaturverlaufs, kommt über den mit der *Clientschicht* verbundenen Web- oder Anwendungsserver in der *Cloud & Applikationsschicht* an. Diese wird vom Web- oder Anwendungsserver an die Datenverarbeitung weitergeleitet. Dort wird die Datenabfrage des Anwenders von mehreren Microservices verarbeitet: Die angeforderten Daten werden aus der Datenbank extrahiert, konvertiert und anschließend wieder mithilfe des Web- oder Anwendungsservers für den Anwender verständlich ausgegeben. Auch kann durch die Datenverarbeitung selbst, ohne vorhergehende Anfrage, eine Benachrichtigung des Anwenders über den Web- oder Anwendungsserver erfolgen. Überschreitet ein eingehender Datensatz einen definierten Grenzwert oder löst er eine Alarmfunktion aus, wird der Anwender aktiv durch das System, bspw. über ein Pop-up-Fenster im Dashboard oder eine E-Mail, benachrichtigt.

Werden vom Anwender oder vom System Aktualisierungen der Gateways oder IoT-Module gefordert, wie die Veränderung eines Sendeintervalls oder ein Firmware-Update, wird ein Aktualisierungsbefehl direkt von der Datenverarbeitung über den Datenpaketfilter an die *Kommunikationsschicht* übermittelt. Darüber hinaus kann ein bidirektionaler Datenaustausch mit externen Datenbanken oder Anwendersystemen außerhalb des Service-Systems erfolgen. Über diverse Schnittstellen und überwacht von Datenpaketfiltern können Datensätze zur weiteren Analyse an andere Systeme übertragen oder dem Service-System zusätzliche Informationen, z. B. aktuelle Lieferinformationen, zur Verfügung gestellt werden. Dabei ist die Kommunikation mit der *Cloud & Applikationsschicht* sowohl von externen Datenbanken und Systemen als auch von der *Kommunikations-* und *Clientschicht* mit entsprechenden Verschlüsselungsprotokollen (bspw. TLS) zu versehen. Ebenso wird der Einsatz eines Active Directorys (ein Verzeichnisdienst) für die Regelung des Datenzugriffs von Anwendern, intelligenten Objekten und angebotenen Systemen benötigt (detaillierte Beschreibung des Berechtigungskonzepts in Abschnitt 6.5).

6.4.4 Schicht 4 – Client

Über die *Clientschicht* kann der Anwender die von der *Cloud & Applikationsschicht* bereitgestellten Daten nutzen (siehe Abbildung 6-28). Dabei spiegelt diese Schicht die technische Umsetzung der Darstellungs- und Ausgabefunktionen der Services aus Unterabschnitt 6.2.1 (hellgrau markiert in den Abbildungen) wider. Konkret werden dem Anwender die Funktionalitäten zur Anzeige, Benachrichtigung oder zum Export angefragter Daten in der *Clientschicht* über zwei Wege bereitgestellt: eine lokale Softwareanwendung oder eine webbasierte Anwendung. So können die Funktionsumfänge der Services sowohl über lokale Softwareanwendungen als auch über eine Weboberfläche genutzt werden. Die beiden Bereitstellungsarten werden im Folgenden genauer beschrieben.

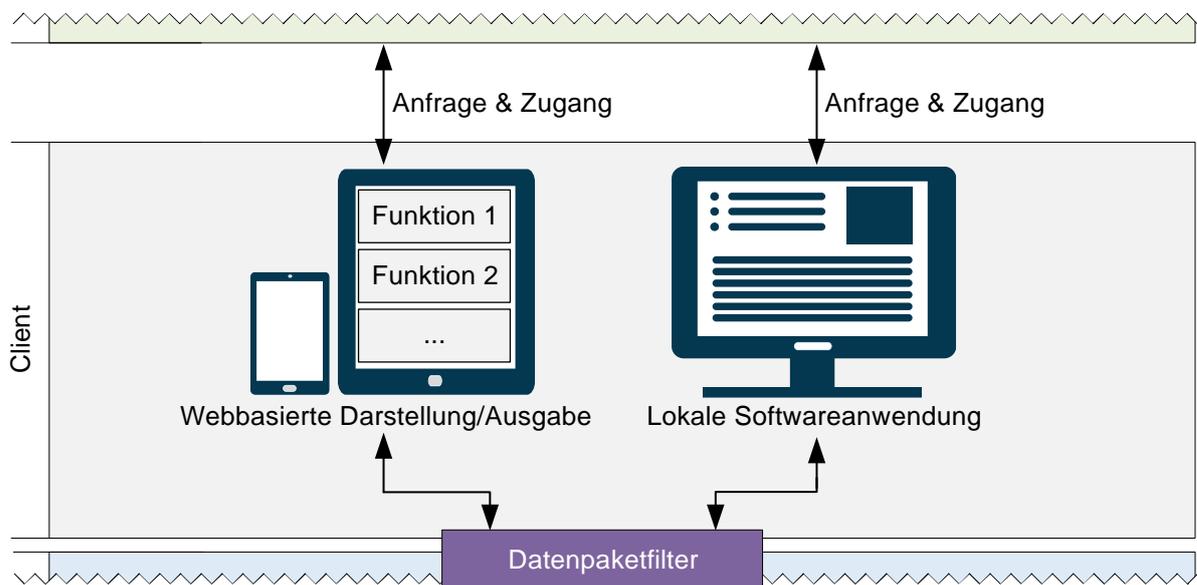


Abbildung 6-28: *Clientschicht der konzipierten Fünf-Schichten-IoT-Architektur*

Die Datenanfrage des Anwenders, wie etwa die Anzeige des Behälterbestands, kann über die lokale Softwareanwendung des Unternehmens, bspw. über ein ERP-System wie SAP, erfolgen. Hier bildet die Implementierung einer softwarespezifischen Schnittstelle zwischen der lokalen Anwendung und dem Anwendungsserver (der *Cloud & Applikationsschicht*) die Grundlage des reibungslosen Datenaustauschs. Dabei muss pro lokaler Softwareanwendung, die eine Verbindung zur Cloud benötigt, eine eigene Schnittstelle implementiert werden. Dies liegt an der Diversität der eingesetzten Softwareprogramme, welche meist unternehmensspezifisch adaptiert sind. Vorteilhaft ist, dass der Anwender in seiner gewohnten Softwareumgebung arbeiten und bei der Steuerung seines Behältermanagementsystems direkt von den Daten des Service-Systems, z. B. den aktuellen Behälterbeständen, profitieren kann. Nachteilig ist, dass aufgrund der unternehmensindividuellen Softwarestrukturen die Implementierung dieser Schnittstellen einen erheblichen Aufwand bedeutet. Gleichzeitig besteht die Gefahr, dass Daten, falls die Synchronisierungshäufigkeit zwischen den Systemen nicht

hoch genug ist, veraltet sind und so falsche Entscheidungen auf Basis inkonsistenter Daten getroffen werden.

Sollten weitere automatisierte Systeme, wie etwa automatische Schranken, Förderer oder Signalleuchten, zur Steuerung des Prozesses mit eingebunden werden, ist auch hierfür jeweils eine eigene Schnittstelle vorzusehen. Wird eine Signalleuchte eingebunden, kann der Mitarbeiter im Wareneingang durch das rote Aufleuchten der Lampe (eine aktive Benachrichtigung) über einen Fehler in der gerade eingetroffenen Lieferung informiert werden. Ein grünes Statuslicht zeigt dem Mitarbeiter, dass er die Lieferung ohne Einschränkungen weiterbearbeiten kann. In jedem Unternehmen und in jeder Abteilung muss im Einzelfall entschieden werden, ob der Aufwand zur Implementierung einer Schnittstelle zwischen *Cloud & Applikationsschicht* und der eigenen Softwareanwendung gerechtfertigt ist.

Der zweite Weg, über den der Anwender eine Datenabfrage einleiten kann, ist die Webanwendung. Über eine Webseite (ein sogenanntes Dashboard) wird, nach erfolgreichem Login, der Zugang zu den gewünschten Daten des Service-Systems ermöglicht. Dabei erlaubt das Cloudhosting in Verbindung mit internetfähigen mobilen Endgeräten einen standortunabhängigen Zugriff auf das Service-System. Hier spielen vor allem die Darstellung der ausgewerteten Datensätze und die einfache Bedienbarkeit der Weboberfläche eine große Rolle. So soll der Anwender auf einen Blick Zusammenhänge erkennen und entsprechende Maßnahmen ergreifen können. Die diversen Darstellungsmöglichkeiten der Webanwendung erlauben mehrere personalisierte Dashboards für jedes Unternehmen. So kann je Mitarbeiter, abhängig von dessen Rolle im Service-System (siehe Abschnitt 6.5), ein individuelles Dashboard implementiert werden. Ein Beispiel: Der Reparaturdienstleister bekommt direkt nach dem Login seine anstehenden Reparaturen und zugehörigen Schadensberichte angezeigt, wohingegen ein Mitarbeiter aus dem Behältermanagement zuerst nur den aktuellen Behälterbestand dargestellt bekommt.

Durch die Webanwendung kann eine kostenintensive Implementierung einer Softwareanwendungsschnittstelle, bspw. bei einem kleineren Reparaturdienstleister, vermieden werden. Im Falle des Reparaturdienstleisters werden dann die benötigten Informationen während der Reparatur über ein mobiles Endgerät abgerufen und der Reparaturbericht wird direkt innerhalb der Webanwendung verfasst. Somit wird durch den Einsatz des Webservers die Teilnahme am Service-System auch für kleinere Dienstleister wirtschaftlich attraktiv.

Bzgl. der Implementierung der einzelnen Funktionen aus dem Funktionsmodell wird am Beispiel der Funktionen F9.2 (Schadensbericht anzeigen) und F11.2 (Anzahl der

imSLTs in Bereich anzeigen) deutlich, dass für jede Funktion eine andere Art der Darstellung, unabhängig davon, ob diese in der Web- oder Softwareanwendung erfolgt, benötigt wird. Nur so kann der Anwender die wichtigsten Informationen auf einen Blick erfassen. Um eine fehlerhafte Bedienung zu vermeiden, muss die Bedienoberfläche entsprechend einfach gestaltet werden. Zusätzlich sind Schulungen zur Bedienung als auch zur Interpretation der Daten nötig, wie bspw. bei neu eingebundenen Dienstleistern für Wartung oder Reparatur. Ziel der Schulungen ist es eine konsistente und zuverlässige Datengrundlage, trotz manueller Dateneingaben, generieren zu können. Ebenso ist auf eine entsprechende Verschlüsselung der Datenübertragung bei der Webanwendung über Hypertext Transfer Protocol Secure (HTTPS) und TLS zu achten. Darüber hinaus sollten alle Benutzeraktivitäten automatisiert überprüft werden, um eine absichtliche Manipulation zu verhindern (z. B. über einen automatischen Plausibilitätscheck).

6.4.5 Schicht 5 – Anwender

Die fünfte Schicht der Architektur, die *Anwenderschicht*, setzt sich aus Funktionen, Rollen und Akteuren zusammen (siehe Abbildung 6-29). Die Benutzereingaben (im Funktionsmodell pastellgrün hinterlegt, siehe Unterabschnitt 6.2.1), sind dieser Schicht explizit zugeordnet. Hierzu zählen u. a. die Funktion F9.3 (Schadensbericht verfassen) und die Funktion F10.2.1.1 (Bereiche für die Bestandserfassung definieren). Diese Funktionen werden verschiedenen Rollen zugeordnet.

Eine Rolle entspricht der unternehmensneutralen Definition aller durch einen Teilnehmer des Service-Systems zu erfüllenden Aufgaben und Pflichten, um die Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems zu gewährleisten. Anhand der Rolle wird außerdem der Datenzugriff des jeweiligen Teilnehmers geregelt (siehe Abschnitt 6.5). Für jeden übergeordneten Service (aus Unterabschnitt 6.2.1) sind jeweils eine *Nutzer-* und in der Regel eine *Anbieterrolle* vorgesehen. Diesen Rollen werden die entsprechenden Benutzereingaben (pastellgrün markierte Funktionen) und physischen Tätigkeiten (pastellorange markierte Funktionen) des Service zugeordnet. Zwar sind die physischen Tätigkeiten Bestandteil der untersten Schicht (*intelligente Objekte*), werden aber den in der *Anwenderschicht* integrierten Rollen serviceabhängig zugewiesen. Dies begründet sich darin, dass die physischen Tätigkeiten als Aufgabe einer Rolle angesehen werden. Die Zuweisung dieser Funktionen zu den jeweiligen Rollen ist in Abbildung 6-29 nicht explizit dargestellt, da der Fokus der Darstellung der Fünf-Schichten-IoT-Architektur auf dem Kommunikationsablauf und auf dem zugehörigen Datenfluss liegt.

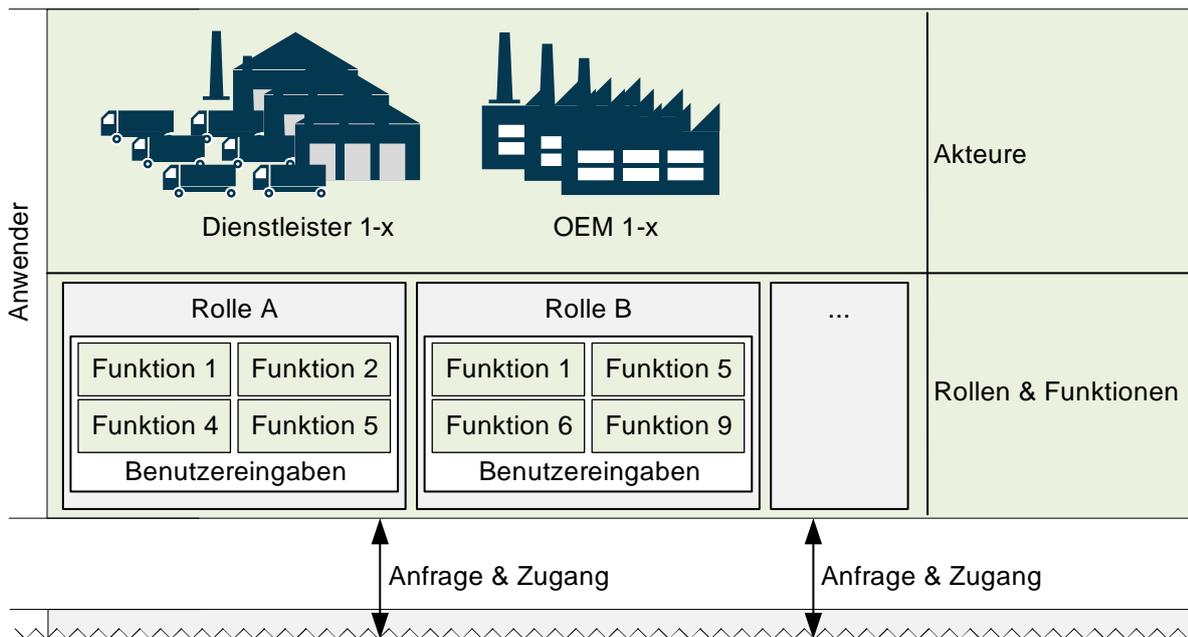


Abbildung 6-29: Detaildarstellung der Anwenderschicht

Den 14 konzipierten Services sind 14 *Nutzerrollen* zugeordnet, welche neben dem Datenzugriff die Aufgaben und Pflichten der Teilnehmer innerhalb des Service-Systems regeln. Es sind für die Services *Pooling-System*, *Rekonfiguration*, *Recycling*, *Wartung*, *Reparatur*, *Reinigung*, *imSLT-Konfigurator*, *Auftragsverfolgung* und *digitaler Schadensbericht* jeweils eine *Anbieterrolle* vorgesehen, da diese Services meist physische Leistungen und darauf aufbauende Benutzereingaben beinhalten. So werden für den Service *Wartung* die Rollen *Nutzer des Wartungsservice* und *Wartungsanbieter* unterschieden. Dabei muss der *Wartungsanbieter* bei jeder durchgeführten *Wartung* einen digitalen *Wartungsbericht* im System hinterlegen, um den vollen Serviceumfang für den *Nutzer des Wartungsservice* zu gewährleisten. Nur wenn alle Funktionen und die darin enthaltenen Aufgaben durch die jeweiligen Rollen durchgeführt werden, kann der entsprechende Service vollumfänglich angeboten werden. Darüber hinaus existieren weitere Rollen, die zur Aufrechterhaltung einer cloudbasierten Plattform benötigt werden, wie etwa: *Cloudanbieter*, *Plattformbetreiber* oder *Systemadministrator* (vgl. [Bar-2006]).

Auf die detaillierte Zuweisung der Funktionen zu den einzelnen Rollen wird im Rahmen dieser Arbeit nicht eingegangen, da der Fokus auf dem übergeordneten Konzept liegt und die detaillierte Zuweisung für diese Arbeit keinen wissenschaftlichen Mehrwert bietet. Auch müsste die Zuordnung auf der untersten Hierarchieebene der Teilfunktionen erfolgen, welche in Unterabschnitt 6.2.1 aufgrund des Umfangs und der wissenschaftlichen Relevanz nicht dargestellt wurde.

Eine weitere wichtige Komponente der *Anwenderschicht* sind die Akteure. Zu diesen zählen Unternehmen oder Mitglieder von Organisationen, die eine aktive Rolle im Service-System übernehmen können. Jeder Akteur, der eine Rolle aktiv übernimmt, ist verpflichtet die darin definierten Aufgaben und Pflichten zu erfüllen. Ein Akteur kann mehrere Rollen innehaben. Somit kann ein Dienstleister sowohl die Rolle *Wartungs-* als auch *Reparaturanbieter* übernehmen, um für sich entstehende Synergien (z. B. Einmalaufwände für die Anbindung und Schulung) zu nutzen. Darüber hinaus kann eine Rolle gleichzeitig von verschiedenen Akteuren übernommen werden, wodurch der Aufbau eines Netzwerks aus lokalen Akteuren bzw. Dienstleistern ermöglicht wird. Als Beispiel dient hier ein Netzwerk aus Dienstleistern, die jeweils die Rolle *Reparaturanbieter* übernommen haben: Alle Dienstleister des Netzwerks besitzen freie Kapazitäten den imSLT fachgerecht zu reparieren und sind verpflichtet die darüber hinaus gehenden Aufgaben der Rolle, wie etwa die digitale Dokumentation des Reparaturberichts, durchzuführen. Wird durch den Kunden eine Reparatur gewünscht, kann, je nach Bedarf und Standort der beschädigten imSLTs, zwischen den verschiedenen lokal verfügbaren Anbietern innerhalb des Netzwerks ausgewählt werden. So sind, bei ausreichenden Reparaturkapazitäten vor Ort, eine schnellere Durchführung der Reparatur und dadurch eine Erhöhung der Verfügbarkeit der Behälter im Kreislauf gewährleistet.

Die klare Teilung zwischen Rolle und Akteur gewährleistet außerdem eine große Flexibilität und Unabhängigkeit von einzelnen Unternehmen und Dienstleistern, da sie, dank der klar definierten Aufgaben und Pflichten innerhalb einer Rolle, bei Bedarf ausgetauscht werden können.

6.5 Berechtigungskonzept für die Nutzung des Service-Systems

Während der Erarbeitung der Fünf-Schichten-IoT-Architektur des Service-Systems zeigte sich, dass, besonders im unternehmensübergreifenden Kontext, ein klares Berechtigungskonzept für den Datenzugriff notwendig ist. So sollen, trotz Nutzung der gleichen Datenbasis und Rollen, zwischen OEM und Zulieferer keine Einblicke in die Produktion des jeweiligen anderen Unternehmens möglich sein. Da dieses Thema, laut der im Rahmen dieser Arbeit befragten Experten, von hoher Priorität für den erfolgreichen Einsatz des unternehmensübergreifenden Service-Systems ist, wird im Folgenden das für die Nutzung des Service-Systems benötigte Berechtigungskonzept erarbeitet.

Wie bereits in Unterabschnitt 2.3.3 beschrieben, besteht eine Berechtigung aus zwei Teilen: der Definition der Ressource, für die die Berechtigung gilt und die Operation

(bspw. read), die in Bezug auf die Ressource freigegeben wird. Dementsprechend muss innerhalb des Berechtigungskonzepts für die einzelnen Rollen (bzw. Anwender) definiert werden, wann welche Art des Zugriffs auf welche Daten vorliegt.

Dabei bietet sich ABAC an, um ein dynamisches Konzept, welches die Anforderungen und Möglichkeiten von intelligenten Objekten aufgreift, zu realisieren (siehe Unterabschnitt 2.3.3). ABAC kann im Gegensatz zu RBAC Zusammenhänge zwischen Objekten, Ressourcen und Regeln detaillierter abbilden und ist so für den unternehmensübergreifenden Einsatz besser geeignet. Da bereits Rollen für die Aufgaben und Pflichten der jeweiligen Akteure eingeführt wurden, bietet sich die direkte Integration dieser Rollen in das Berechtigungskonzept an. So wird für das Berechtigungskonzept eine Kombination von ABAC und RBAC, konkret das RBAC-A role centric-Konzept, verwendet. Dieses Konzept erlaubt bei einer rollendominierten Zuordnung von grundlegenden Berechtigungen diese dynamisch, bspw. in Abhängigkeit der aktuellen Attribute eines imSLT, zu regulieren.

Das übergeordnete Vorgehen zur Bearbeitung von Datenzugriffsanfragen innerhalb des Service-Systems ist in Abbildung 6-30 dargestellt und wird durch das Active Directory in der *Cloud & Applikationsschicht* durchgeführt. Es gestaltet sich wie folgt: Fordert der Anwender (Anfragesteller) einen Datensatz aus dem Service-System an,

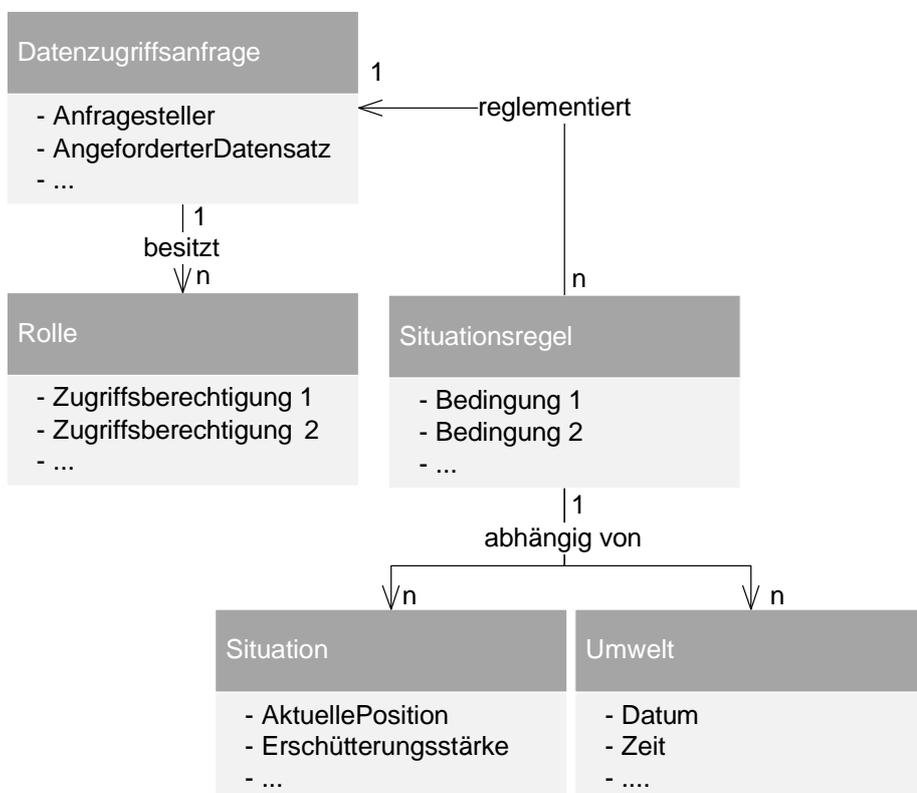


Abbildung 6-30: Berechtigungszuweisung basierend auf dem RBAC-A role centric-Konzept

wird im ersten Schritt, anhand der ihm zugeordneten Rollen und den damit einhergehenden Zugriffsberechtigungen, der angeforderte Datenzugriff überprüft. Sollte eine grundsätzliche Berechtigung für die Datenanfrage vorliegen, werden zusätzlich die damit verbundenen Situationsregeln abgefragt. Eine Situationsregel reglementiert, basierend auf vordefinierten Bedingungen, den durch die Rolle gewährten Datenzugriff. Erfüllt die Datenzugriffsanfrage alle Situationsregeln, wird dem Anwender der Datenzugriff gewährt. In diesem Zusammenhang wird in den folgenden Absätzen auf die Zuweisung der Berechtigungen zu Rollen und auf den Ablauf von Situationsregeln eingegangen.

Alle Akteure im Netzwerk bekommen anhand ihrer zugewiesenen Rollen neben den Aufgaben und Pflichten auch grundlegende Datenzugriffsberechtigungen zugeordnet. Die einzelnen Zugriffsberechtigungen einer Rolle werden dabei durch eine klassische Rollen-Rechte-Matrix (siehe vereinfachtes Beispiel in Tabelle 6-3) festgelegt. Diese Matrix definiert, auf welche Datenklassen bzw. Attribute des konzeptionellen Datenmodells die jeweilige Rolle Zugriff hat. Der Datenzugriff wird zusätzlich über vier Berechtigungsstufen charakterisiert. Diese regeln die erlaubten Operationen bei jedem Datenzugriff: Stufe eins enthält lediglich eine Leseberechtigung (read), wohingegen die zweite Stufe bereits Lese- und Schreiboperationen (read und write) ausführen darf. Die dritte Stufe kann neue Datensätze innerhalb der definierten Datenklasse anlegen (read, write und create). Nur die vierte Stufe ist darüber hinaus noch berechtigt Datensätze zu löschen (read, write, create und delete).

Die detaillierte Zuweisung aller benötigten Datenzugriffsberechtigungen für die jeweilige Rolle erfolgt anhand der einzelnen Attribute innerhalb der Attributspezifikation des vollständigen Datenmodells. Diese detaillierte Zuweisung wird nicht explizit dargestellt, da der Fokus dieser Arbeit auf dem übergeordneten Berechtigungskonzept liegt. Deshalb werden die entstehenden Herausforderungen bei der Zuweisung von Rollen und der damit verbundenen Datenzugriffsberechtigungen anhand eines Beispiels erläutert: In Tabelle 6-3 ist ein Auszug aus den Zugriffsberechtigungen je Rolle, in Bezug auf die übergeordneten Datenklassen des konzeptionellen Datenmodells (vgl. Abschnitt 6.3), dargestellt. Das Beispiel soll verdeutlichen, dass mehrere Rollen den Zugriff auf dieselben Datensätze, hier aufgezeigt anhand der Positionsdaten, benötigen. Dies liegt an der Überschneidung und Nutzung von Synergieeffekten zwischen den einzelnen Services: Der *Nutzer des Service digitales Behältermanagement*, benötigt die Positionsdaten, um sich den Behälterbestand in den jeweiligen Bereichen anzeigen zu lassen. Auch kann der *Anbieter des Reparaturservice* anhand der Positionsdaten den Standort des zu reparierenden imSLT bestimmen und so den geforderten Behälter instandsetzen. Der *Nutzer des Service Zustandsüberwachung* profitiert direkt von einer Kombination aus Zustands- und Positionsdaten, um zuverlässigere Auswertungen

(bspw. bei Outdoorlagerungen) durchführen zu können. Dementsprechend wird allen drei Rollen in Tabelle 6-3 eine Leseberechtigung für die Datenklasse *Positionsdaten* zugeordnet.

Tabelle 6-3: *Beispielhafte Zuordnung von Berechtigungen der Stufe 1-4 bzgl. der Datenklassen des Service-Systems*

Rollen	Datenklassen					
	Positionsdaten	Bereich	Schadensbericht	Reparaturbericht	Wartungsbericht	...
Nutzer digitales Behältermanagement	1	4				
Nutzer Reparaturservice			1	1		
Anbieter Reparaturservice	1		1	3	1	
Nutzer Zustandsüberwachung	1					
...						

1 read
 2 read, write
 3 read, write, create
 4 read, write, create, delete

Nehmen darüber hinaus unterschiedliche Unternehmen (bspw. OEM und Zulieferer) die Rolle *Nutzer digitales Behältermanagement* ein, sind auch hier weitere Regelungen notwendig, damit anhand der Positionsdaten keine konkreten Einblicke in die Produktion der anderen Unternehmen, bspw. durch den Bestandsverlauf am Montageband, möglich sind. Hier kommen die sogenannten Situationsregeln zum Einsatz, die das klassische RBAC erweitern und so verhindern, dass eine Vielzahl von unternehmensspezifischen Rollen benötigt werden, um den Datenzugriff ausreichend zu regulieren.

Grundsätzlich besteht eine Situationsregel aus einer oder mehreren Bedingungen, die von konkreten Datenwerten abhängig sind. Diese Datenwerte entstammen dabei der aktuellen Situation (z. B. die aktuelle Position des imSLT) oder der Umwelt (z. B. das Datum). Die Situationsregel reglementiert, basierend auf der Erfüllung der jeweiligen Bedingungen, den durch die Rolle gewährten Datenzugriff. Dabei können die Datenwerte auf denen die Bedingung beruht, von den Daten des angeforderten Datenzugriffs abweichen. Hierzu ein einfaches Beispiel: Der *Anbieter des Reparaturservice* möchte die aktuellen Schadensberichte der zu reparierenden imSLT anfordern, um seine Reparaturmaßnahmen besser planen zu können. Damit verhindert wird, dass er alle im System befindlichen Schadensberichte einsehen kann (würde der Berechtigung seiner Rolle entsprechen), prüft eine Situationsregel, welche imSLTs aktuell als „zu reparieren“ markiert sind. Nach Abschluss der Überprüfung bekommt der Reparaturdienstleister Zugriff auf alle Datensätze der Klasse *Schadensbericht*, bei denen diese Zusatzbedingung erfüllt ist.

Auch die aktuellen Daten des imSLT werden genutzt, um den Datenzugriff der Anwender dynamisch zu reglementieren. Es folgt ein Beispiel der situationsabhängigen Zugriffsregelung auf Positionsdaten, basierend auf der aktuellen Position des imSLT aus der Sicht von Unternehmen A (siehe Abbildung 6-31):

Sowohl Unternehmen A als auch Unternehmen B haben die Rolle *Nutzer des Service digitales Behältermanagement* inne, welche ihnen den grundsätzlichen Zugriff auf Positionsdaten ermöglicht. Der imSLT übermittelt kontinuierlich seine aktuelle Position (ID, Breitengrad, Längengrad und Zeitstempel) an das Service-System. Basierend auf den implementierten Situationsregeln, bekommt Unternehmen A Zugriff auf die genauen Positionsdaten des jeweiligen imSLT, solange sich dieser innerhalb des Bereichs X befindet. Der Bereich X umfasst dabei das gesamte Werksgelände von Unternehmen A. Somit kann Unternehmen A von allen imSLTs, die sich auf dem Werksgelände befinden, den genauen Positionsverlauf vom Wareneingang über die Montage bis zum Warenausgang und den zugehörigen Behälterbestand je Bereich einsehen.

Verlässt der imSLT den Bereich X, wird die Genauigkeit der Positionsbestimmung für Unternehmen A eingeschränkt. Dementsprechend kann Unternehmen A, für die Zeitspanne in der sich der imSLT außerhalb des Bereichs X befindet, nur einsehen bei welchem Unternehmen sich der Behälter gerade befindet. Trotz der Einschränkung in der Genauigkeit ist es dem Unternehmen A möglich zu überprüfen, ob der imSLT bei Unternehmen B rechtzeitig eingetroffen ist. Gleichzeitig wird verhindert, dass Unternehmen A erkennen kann, in welchem Unternehmensabschnitt sich dieser Behälter gerade befindet. Da die übermittelten Positionsdaten des imSLT mit einem aktuellen Zeitstempel versehen sind, kann diese Situationsregel auch nachträglich, beim Zugriff

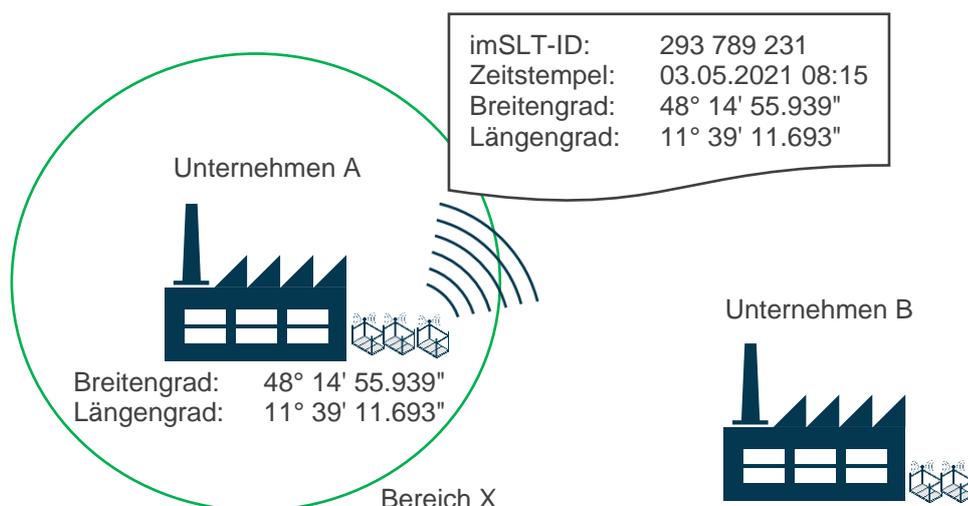


Abbildung 6-31: Situationsregel für eine dynamische Zugriffsregelung auf Positionsdaten

auf Positionsverläufe, angewandt werden. Wie das beschriebene Beispiel zeigt, können mithilfe von Situationsregeln mehrere Unternehmen im gleichen Behälterkreislauf den Service *digitales Behältermanagement* ohne größere Einschränkungen nutzen.

Die detaillierte Darstellung aller benötigten Situationsregeln für das Service-System wird im Rahmen dieser Arbeit nicht beschrieben, da diese sehr umfangreich und abhängig von der jeweiligen Unternehmenskonstellation im Behälterkreislauf ist. Durch die Auflistung der einzelnen Situationsregeln wird kein nennenswerter wissenschaftlicher Mehrwert erzielt, weshalb darauf verzichtet wird.

6.6 Zusammenfassung und beispielhafter Ablauf eines Service

Ziel der *Prescriptive Study* in Kapitel 6 war die Konzeption einer Architektur für ein Service-System mit imSLTs. Dafür wurden in einem ersten Schritt die konzipierten Services und Funktionsumfänge, die zur Behebung der in Kapitel 5 identifizierten Schwachstellen und zur Erfüllung der abgeleiteten Anforderungen dienen, präsentiert. Diese wurden anschließend, als Vorbereitung für die Nutzevaluierung (siehe Abschnitt 7.4), anhand ihrer zu erzielenden Nutzen kategorisiert. Darauf aufbauend wurde das für den Einsatz der Services benötigte konzeptionelle Datenmodell vorgestellt. Die präsentierten Ergebnisse flossen in die Gestaltung der Fünf-Schichten-IoT-Architektur und des erstellten Berechtigungskonzepts mit ein. Als zusammenfassende Darstellung der Fünf-Schichten-IoT-Architektur wird im Folgenden ein konkretes Beispiel, der Ablauf des Service *Zustandsüberwachung*, beschrieben (siehe Abbildung 6-32, S. 141).

Für das Beispiel betrachten wir einen voll beladenen imSLT. Das IoT-Modul des imSLT ist mit Sensoren für Temperatur, Neigung und Beschleunigung ausgerüstet, da der imSLT sensible Produkte, in diesem Beispiel Lithium-Ionen-Batteriezellen, in einem Behälterkreislauf transportiert. Bei Batteriezellen besteht die Gefahr, dass Temperaturschwankungen oder Erschütterungen zu nicht sichtbaren Beschädigungen führen können. Diese können eine zeitverzögerte, spontane Entzündung der Zelle auslösen (vgl. Abschnitt 1.1). Deshalb erfasst die im imSLT integrierte Sensorik kontinuierlich Temperatur, Neigung und Beschleunigung. Dabei ist das IoT-Modul so eingestellt, dass die aufgezeichneten Maximalwerte der Sensormessungen intervallbasiert alle 15 min an das nächstgelegene Gateway übertragen werden.

Während des Transports des voll beladenen imSLT mit einem Gabelstapler zur Montagelinie kommt es, aufgrund einer personenbedingten Vollbremsung am Fußgängerüberweg, zum Herunterfallen des imSLT aus geringer Höhe. Der Staplerfahrer schätzt

den Vorfall als unbedenklich ein und setzt den Transport fort. Die durch den Aufprall erzeugten Neigungs- und Beschleunigungswerte werden durch das IoT-Modul neben der ID und der aktuellen Position des imSLT an das nächstgelegene Gateway gesendet. Dort wird der Payload entschlüsselt, vorverarbeitet und in eine EPCIS-konforme Nachricht (EPCIS-Event) umgewandelt.

Das EPCIS-Event wird über die Internetanbindung des Gateways an die *Cloud & Applikationsschicht* weitergeleitet. Nach der Verifizierung durch den Paketfilter, wird die Nachricht dupliziert: Die erste Instanz wird in ihrer Rohfassung im EPCIS-Repository abgelegt, wohingegen die zweite Kopie direkt in die Datenverarbeitung gegeben wird. Innerhalb der Datenverarbeitung werden von diversen Microservices die Positions- und Sensorwerte aufbereitet. So wird u. a. der Grad der Erschütterung aus einer Kombination von Neigung und x-, y- und z-Beschleunigungswerten berechnet. Die aufbereiteten Sensor- und Positionsdaten werden, inkl. der ID des betroffenen Behälters, sowohl in einer Datenbank gespeichert als auch an weitere Microservices für zusätzliche Verarbeitungsschritte übergeben. Darunter befindet sich auch der Microservice zur Grenzwertüberwachung. Dieser gleicht den Grad der Erschütterung des aktuellen Datensatzes mit dem im System hinterlegten Grenzwert ab. Dabei ist, wie durch das konzeptionelle Datenmodell vorgegeben, ein Grenzwert pro Behälterkreislauf definiert. Dieser wird durch den Microservice anhand der Behälter-ID aus der Datenbank extrahiert.

Im vorliegenden Beispiel wird der durch den Anwender definierte Grenzwert überschritten und der Microservice löst eine Alarmfunktion aus. Diese bewirkt, dass die Grenzwertüberschreitung sowohl in einer Datenbank gespeichert als auch direkt über den Webserver als Push-Benachrichtigung auf das Endgerät des Anwenders gesendet wird. Dabei überprüft das Active Directory, dass nur Anwender benachrichtigt werden, die die Rolle *Nutzer Zustandsüberwachung* innehaben und, basierend auf den Situationsregeln für den betroffenen imSLT, in diesem Moment zugriffsberechtigt sind. Der Anwender kann anschließend von seinem mobilen Endgerät direkt auf die Benachrichtigung zugreifen. Er bekommt den Ort, das Ausmaß der Grenzwertverletzung, die Behälter-ID und das transportierte Produkt angezeigt. Sollte anhand der Grenzwertüberschreitung bereits abzusehen sein, dass die in diesem Beispiel transportierten Batteriezellen beschädigt wurden, kann der Anwender entsprechende Maßnahmen einleiten. So ist eine frühzeitige Reaktion durch einen zuständigen Mitarbeiter möglich, bevor es zu weiteren Komplikationen, z. B. den Verbau der beschädigten Zellen, kommt. Auch kann der Anwender, in diesem Fall ein Mitarbeiter des Behältermanagements, anhand der Positionsdaten des Vorfalls, die entstandenen Kosten nachträglich den verursachenden Abteilungen oder Unternehmen zuordnen und Maßnahmen zur zukünftigen Vermeidung solcher Vorfälle treffen. In diesem Beispiel könnten

durch den Einsatz eines Ampelsystems am Fußgängerüberweg zukünftige Vollbremsungen durch den Staplerfahrer vermeiden werden.

Wie das beschriebene Beispiel zeigt, wurde in Kapitel 6 das Architekturkonzept für ein Service-System mit imSLTs erfolgreich aufgestellt. Dieses ermöglicht die Potenziale von intelligenten, modularen Sonderladungsträgern in Form eines Service-Systems zu erschließen und für die beteiligten Unternehmen bereitzustellen. Somit wurden sowohl das Ziel der *Prescriptive Study* als auch die übergeordnete Zielsetzung dieser Arbeit, die *Konzeption einer Architektur für den unternehmensübergreifenden Behälterkreislauf, die die Potenziale von intelligenten, modularen Sonderladungsträgern erschließt und diese für Unternehmen nutzbar macht*, erreicht. Darauf aufbauend werden im folgenden Kapitel die erzielten Ergebnisse evaluiert.

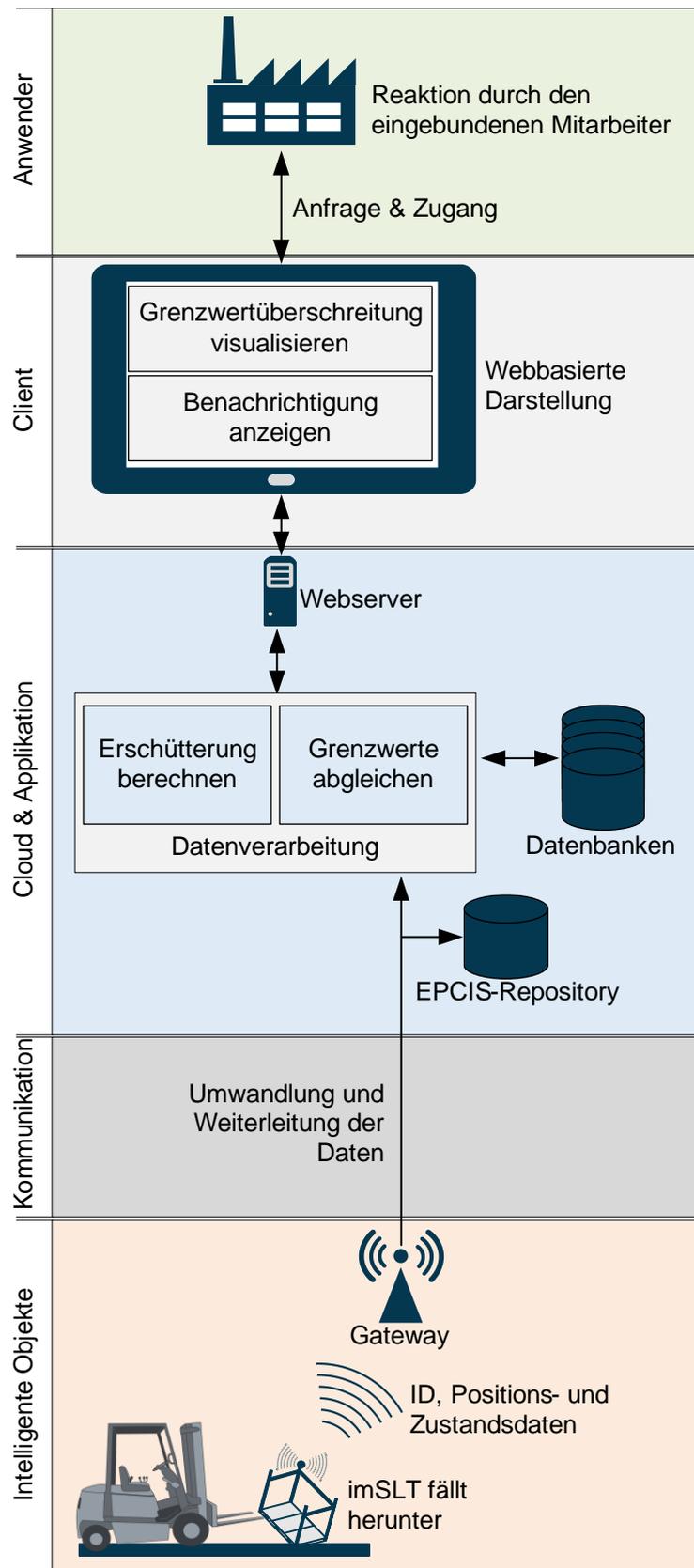


Abbildung 6-32: Beispielhafter Ablauf des Service Zustandsüberwachung innerhalb der Fünf-Schichten-IoT-Architektur

7 Evaluierung der konzipierten Architektur

Kapitel 7 widmet sich der Evaluierung der konzipierten Architektur und zählt zur *Descriptive Study II* dieser Arbeit. So werden als erstes die strukturierte Vorgehensweise und die eingesetzten Methoden beschrieben. Anschließend werden in den darauffolgenden drei Abschnitten die Umsetzbarkeit der konzipierten Architektur evaluiert, die erreichten Ergebnisse mit den in Abschnitt 5.3 aufgelisteten Anforderungen abgeglichen und der erzielte Nutzen bewertet. Ein Fazit und die Beantwortung der Forschungsfragen runden Kapitel 7 ab.

7.1 Beschreibung des Evaluationsvorgehens

Das übergeordnete Vorgehen für die Evaluation orientiert sich an den fünf Schritten der *Descriptive Study II* von *Blessing und Chakrabarti* (vgl. [Ble-2009, S. 196f.]):

1. Existierende Dokumentationen sammeln und analysieren
2. Evaluationsfokus festlegen
3. Evaluationsplan entwickeln
4. Evaluation durchführen
5. Evaluationsübergreifendes Fazit ziehen.

Der erste Schritt, die Sammlung und Analyse existierender Dokumente, wurde bereits durch die Präsentation der erzielten Ergebnisse in Kapitel 3 bis 6 abgeschlossen.

Der Fokus der Evaluation wird durch die eingangs formulierte Zielsetzung (Abschnitt 1.2) und identifizierte Forschungslücke (Abschnitt 4.1) festgelegt: das Architekturkonzept für ein Service-System mit imSLTs. Es gibt diverse Methoden, u. a. szenario-, softwarearchitektur- und performancebasierte Ansätze (vgl. [Pat-2015; Sha-2012; Bab-2004]), um Architekturen zu evaluieren. Diese kommen allerdings nicht für die Bewertung der in Kapitel 6 vorgestellten Architektur in Frage, da aufgrund der rein konzeptionellen Ausführung die Daten- und Wissensgrundlage (bspw. Prozessausführungszeiten) zur Durchführung dieser Methoden nicht gegeben oder schwer quantifizierbar sind [Sha-2012]. Auch Methoden für den Vergleich von verschiedenen Architekturen (vgl. [Ang-2012]) können nicht für die gezielte Bewertung der konzipierten Architektur eingesetzt werden [Sha-2019]. Deshalb wird in dieser Arbeit der Ansatz gewählt, das Architekturkonzept anhand einer prototypischen Implementierung zu evaluieren. Dementsprechend richtet sich der Evaluationsfokus auf die Überprüfung

der Umsetzbarkeit, der Anforderungserfüllung und des Nutzens der konzipierten Architektur für das Service-System mit imSLTs, basierend auf einer prototypischen Implementierung.

Der bzgl. des gewählten Evaluationsfokus aufgestellte Plan für die zielgerichtete Durchführung der Evaluierung (Schritt 3: Evaluationsplan entwickeln) und die dabei eingesetzten Methoden sind in Abbildung 7-1 dargestellt.

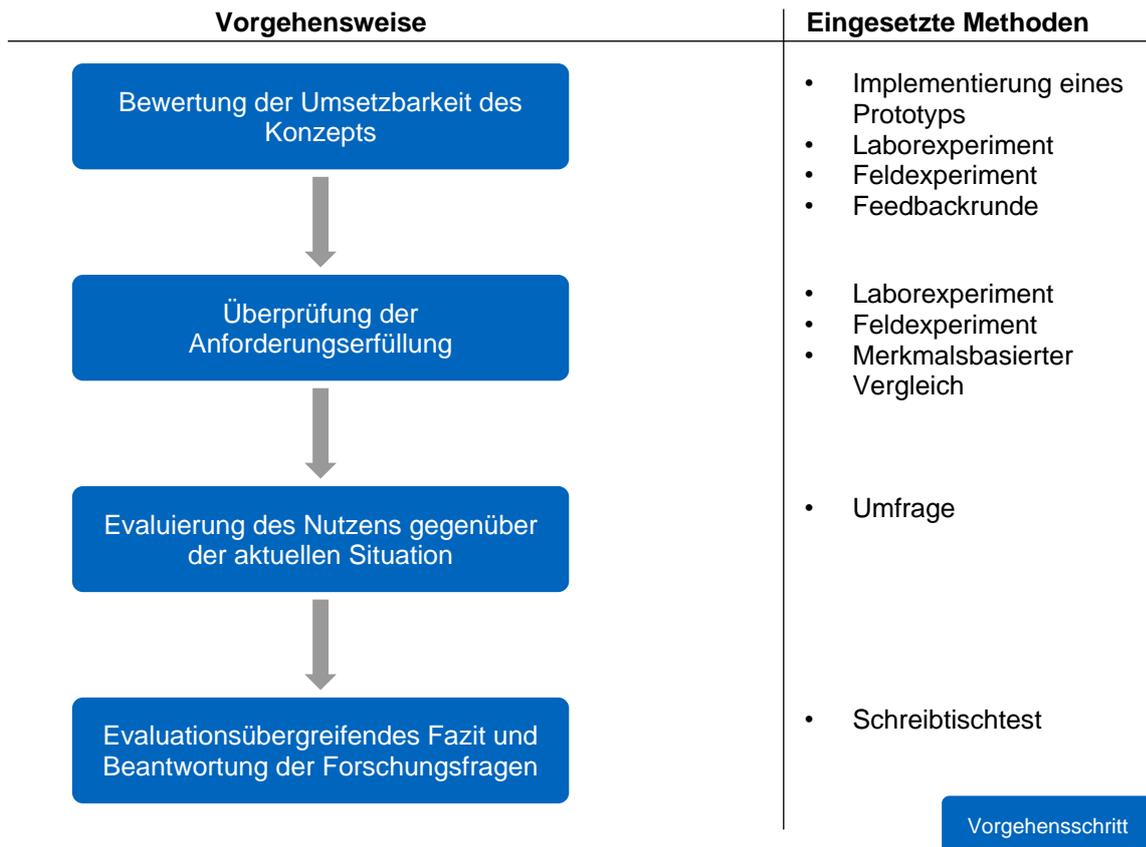


Abbildung 7-1: Evaluierungsplan und eingesetzte Methoden

Der Abbildung folgend wird in den anschließenden Abschnitten die Evaluation durchgeführt (Schritt 4: Evaluation durchführen). Für die Evaluierung der Umsetzbarkeit des Architekturkonzepts kommen die Implementierung eines Prototyps sowie Labor- und Feldexperimente zum Einsatz (siehe Abschnitt 7.2). Dabei wird die Umsetzbarkeit der Fünf-Schichten-IoT-Architektur u. a. auch über die Funktionsfähigkeit der durch die Architektur zu realisierenden Services überprüft. Die durchgeführten Experimente dienen neben einem merkmalsbasierten Vergleich der Überprüfung der Anforderungserfüllung (siehe Abschnitt 7.3). Ziel der Architektur ist es, die Potenziale von imSLTs zu erschließen und so einen Nutzen für das Behältermanagement zu generieren. Daher wird der Nutzen der Fünf-Schichten-IoT-Architektur über die durch das Architekturkonzept bereitgestellten Services bewertet. Für die Evaluierung des Nutzens wird eine

Umfrage bzgl. der in Unterabschnitt 6.2.2 dargestellten Nutzenkategorien mit Anwendern des implementierten Service-Systems und Experten aus dem Behältermanagement durchgeführt (siehe Abschnitt 7.4).

Der fünfte und letzte Schritt der Vorgehensweise von *Blessing und Chakrabarti* (vgl. [Ble-2009, S. 196f.]), das evaluationsübergreifende Fazit, wird neben der Beantwortung der eingangs gestellten Forschungsfragen in Abschnitt 7.5 beschrieben.

7.2 Evaluierung der Umsetzbarkeit

Um die Umsetzbarkeit der Architektur zu evaluieren, werden in einem ersten Schritt passende Einsatzszenarien für die entwickelte Architektur sowohl für den Labor- als auch für den Feldeinsatz festgelegt. Das Ziel der Laborexperimente ist es, die Anwenderprozesse eines voll funktionsfähigen Service-Systems nachzubilden. Hierfür werden im Labor die Prozesse des Behälterkreislaufs nachgestellt, um die Architektur und die angebotenen Services entsprechend praxisnah überprüfen zu können. Konkret werden beispielhafte (De-)Montage-, Lager-, Transport- und Handhabungsprozesse für den imSLT umgesetzt. Für das Feldexperiment wird, in Abstimmung mit zwei Partnern einer Supply Chain, innerhalb des Projekts iSLT.NET (vgl. [Gra-2020]) ein Versuchsaufbau unter Realbedingungen in einem aktiven Behälterkreislauf durchgeführt. Dieser zielt drauf ab, die Umsetzbarkeit der Architektur und des Service-Systems unter Realbedingungen zu zeigen. Bei diesem Einsatzszenario handelt es sich um einen geschlossenen Behälterkreislauf zwischen OEM und Zulieferer, konkret um die JIS-Anlieferung von Türinnenverkleidungen. Die zur Evaluierung der Umsetzbarkeit prototypisch implementierte Fünf-Schichten-IoT-Architektur und die mit der Architektur durchgeführten Versuchsreihen werden im Folgenden beschrieben.

7.2.1 Prototypische Implementierung der Fünf-Schichten-IoT-Architektur

Der implementierte Prototyp der konzeptionierten Fünf-Schichten-IoT-Architektur (siehe Abbildung 7-2) zielt darauf ab, in beiden Einsatzszenarien sowohl in einem aktiven Behälterkreislauf als auch im Labor prozessrelevante Daten zu sammeln und diese gebündelt als Services den Anwendern bereitzustellen. Die technische Umsetzung und der Workflow je Architekturschicht werden analog zum Aufbau von Abschnitt 6.4, beginnend mit der Schicht *intelligente Objekte*, im Weiteren genauer beschrieben. Anschließend wird in Unterabschnitt 7.2.2 die Umsetzung der auf dieser Architektur basierenden Services vorgestellt und deren Funktionsfähigkeit überprüft. Teilumfänge der implementierten Fünf-Schichten-IoT-Architektur und der durchgeführten Laborexperimente wurden bereits in [Zei-2020b] veröffentlicht.

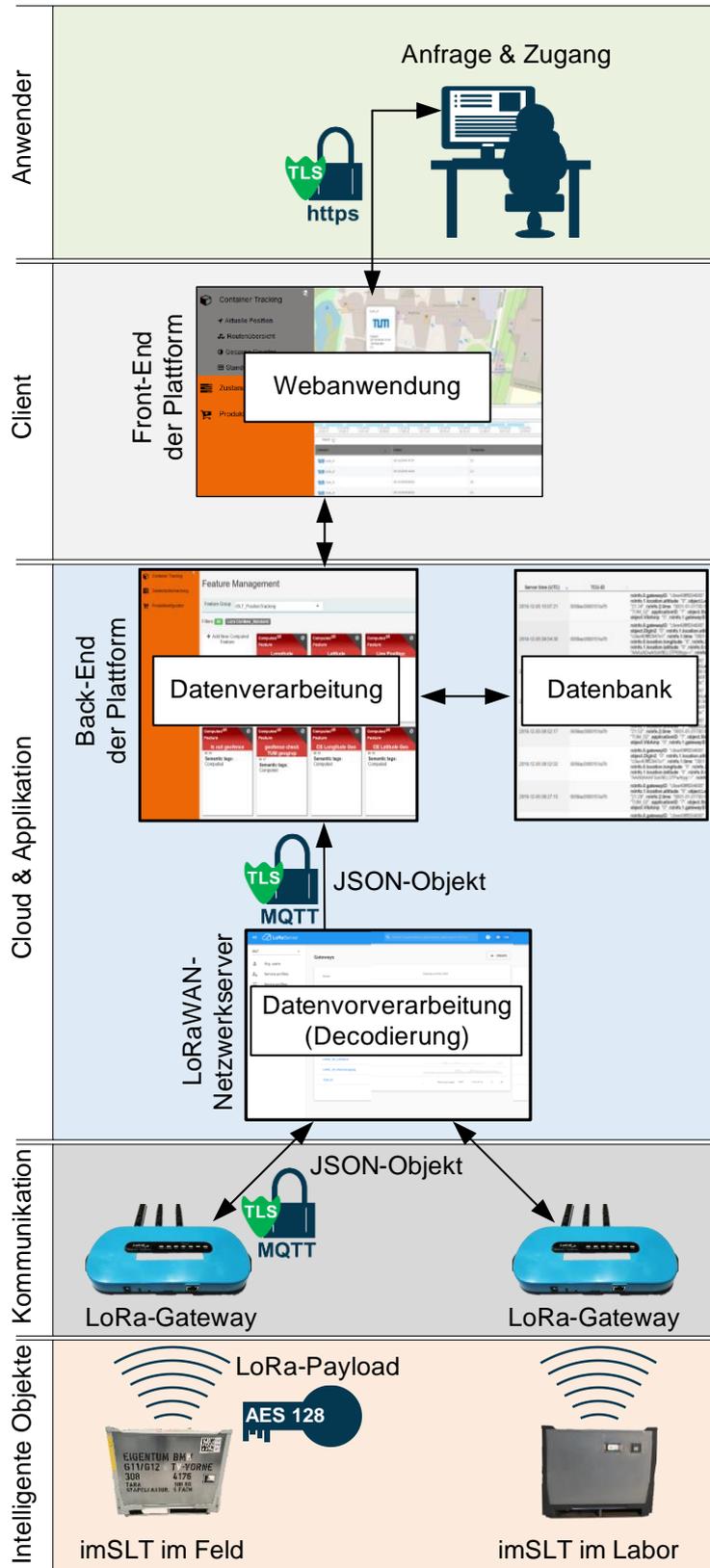


Abbildung 7-2: Prototypische Implementierung der Fünf-Schichten-IoT-Architektur [in Anlehnung an Zei-2020b]

Die imSLTs des Feld- und Laboreinsatzes bilden die unterste Schicht der Fünf-Schichten-IoT-Architektur (*intelligente Objekte-Schicht*). Dabei bestehen die Behälter aus einem Außenbehälter, welcher aus standardisierten Modulen montiert wird, einer speziell für den Behälterkreislauf entwickelten Produktaufnahme und einem IoT-Modul. Die bauliche Gestaltung der imSLTs ist nicht Fokus dieser Arbeit und kann in [Mei-2018] und [Gra-2020] nachvollzogen werden. Für den Feldversuch befinden sich 43 imSLTs in einem aktiven Behälterkreislauf zwischen einem Zulieferer und einem OEM. Sie werden für die JIS-Anlieferung von Türinnenverkleidungen verwendet. Drei baugleiche imSLTs werden an Forschungsinstituten für Laborexperimente eingesetzt. Die IoT-Module sind sowohl in die Seitenverkleidung (siehe Abbildung 7-3) als auch in den Unterboden des imSLT integriert, um bei intensiver Handhabung eine Beschädigung des Moduls zu verhindern. Die Anbringungspunkte der IoT-Module wurden vom Autor dieser Arbeit vorab mit der Unterstützung einer Studienarbeit (vgl. [fml-2019a]) durch Versuchsreihen ermittelt. Die Versuchsergebnisse wurden in [Gra-2020] veröffentlicht.

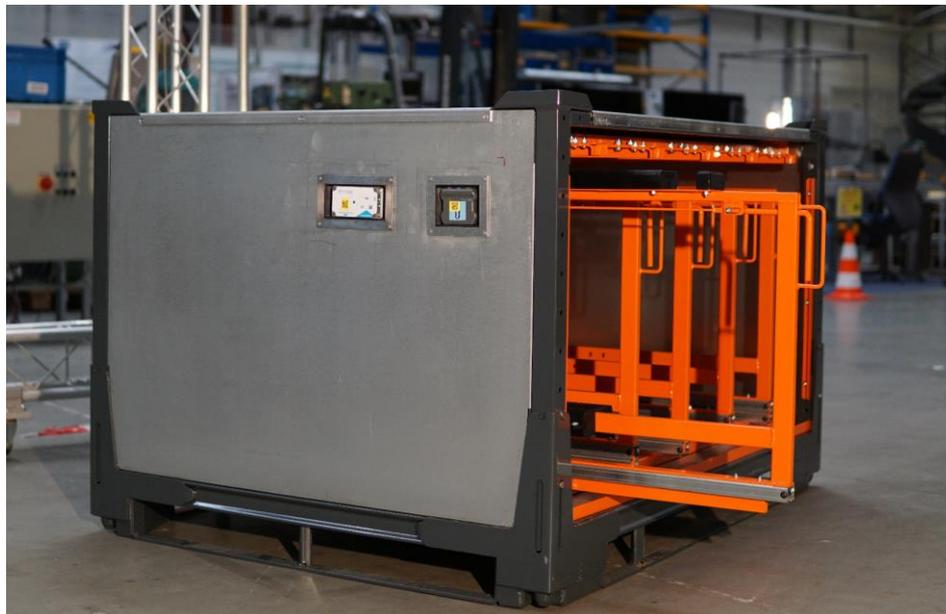


Abbildung 7-3: Prototyp des imSLT, ausgerüstet mit zwei verschiedenen IoT-Modulen

Auch der Vergleich, die Auswahl und die Vorversuche sowohl in Bezug auf mögliche Technologien für das IoT-Modul als auch in Bezug auf die Hardwarekomponenten selbst (bspw. diverse IoT-Module von verschiedenen Herstellern) wurden durch den Autor dieser Arbeit, unterstützt von zwei Studienarbeiten (vgl. [fml-2018c] und [fml-2019a]), vorab durchgeführt und in [Zei-2019b] und [Gra-2020] veröffentlicht. Basierend auf diesen Versuchen werden für die prototypische Implementierung die Geräte *iTalks MCS 1608 Full Sensor* von MCS und der *HybridTAG L500* von Conbee ausgewählt. Beide IoT-Module sind von der Geräteklasse A (siehe Unterabschnitt 2.4.2) und haben ein LoRa-Funkmodul, einen GPS-Chip und diverse Sensoren, u. a. zur Messung der Beschleunigungen (in x-, y- und z-Richtung) und der Umgebungstemperatur,

verbaut. Zusätzlich wird ein QR-Code mit der eindeutigen Behälter-ID am IoT-Modul angebracht, um die Erfassung der Behälter-ID mit einem Tablet zu ermöglichen. Die Funktechnologie LoRa wird aufgrund ihres geringen Energieverbrauchs bei hohen Reichweiten ausgewählt, um so die prozessbedingten Anforderungen des Feldeinsatzes bzgl. der langen Batterielaufzeit und der geringen Infrastrukturaufwände zu erfüllen (siehe vereinfachter Vergleich von Funktechnologien mit den Anforderungen der Einsatzszenarien in Tabelle A-1 in Anhang A.1). So reduziert der Einsatz von LoRa aufgrund der hohen Reichweiten und der guten Gebäudedurchdringung die Anzahl der Gateways, die für die Netzabdeckung der Testgelände erforderlich sind (vgl. Versuche in [Zei-2019b]). Die Lokalisierung über GPS bietet für die prototypische Anwendung die Möglichkeit, die imSLTs während des Einsatzes zu orten, ohne dass eine aufwendige Infrastruktur installiert werden muss. Um herstellerabhängige Effekte während der Versuchsphase nachvollziehen zu können, werden die Endgeräte beider Hersteller parallel sowohl im Feld- als auch im Laborexperiment eingesetzt.

Für das Feldexperiment werden die LoRa-Gateways an zentralen Positionen in den Werken des OEM und des Zulieferers angebracht, um einen möglichst großen und prozessrelevanten Bereich abzudecken. U. a. werden beim OEM die Gateways am Wareneingang, bei der Entnahme der Bauteile und am Warenausgang montiert, um den Materialfluss nachverfolgen zu können. Für das Laborexperiment wird ein Messgelände an der Technischen Universität München (TUM) in Garching mit drei Gateways ausgestattet. Die LoRa-Gateways werden auf erhöhten Positionen, zwei in der Versuchshalle des Lehrstuhls für Fördertechnik Materialfluss Logistik und eines am Dach des Universitätsgebäudes, montiert (siehe Abbildung 7-4, S. 150). Dabei überschneiden sich die Abdeckungsbereiche der Gateways deutlich. Ziel ist es, durch die Überschneidungen Empfangsprobleme aufgrund unzureichender Netzwerkabdeckung mit LoRa bei den Laborexperimenten ausschließen zu können. Die Gateways werden sowohl für den Feld- als auch für den Laboreinsatz über ihre LAN-Schnittstelle, getrennt von den internen Firmensystemen, mit dem Internet verbunden.

Die am imSLT angebrachten IoT-Module erfassen während des Einsatzes sowohl im Labor als auch auf Shopfloor-Ebene aktuelle GPS-Koordinaten, Umgebungstemperaturen und auftretende Beschleunigungen. Die gesammelten Daten werden, inkl. der aktuellen Batteriespannung und der ID des IoT-Moduls, als LoRa-Payload an die nächstgelegenen LoRa-Gateways und damit an die *Kommunikationsschicht* übermittelt. Die Nachrichtenübertragung findet intervallbasiert statt. Ergänzend dazu kann die Übertragung durch ein Event, bspw. bei Messung einer starken Erschütterung, ausgelöst werden. Um eine sichere Datenübertragung zu gewährleisten, sind alle durch das IoT-Modul versendeten Payloads mit dem Standard AES-128 (Advanced Encryption Standard-128) verschlüsselt. Als Hardwareausführung für das LoRa-Gateway wird das

Sentrius Series RG186 von Laird eingesetzt, da es kostengünstig in der Anschaffung ist und innerhalb der Einsatzszenarien hohe Reichweiten realisieren kann (vgl. [Zei-2019b] und [fml-2018c]).

Innerhalb der *Kommunikationsschicht* werden die LoRa-Payloads des imSLT durch das empfangende Gateway konsolidiert und in ein standardisiertes JSON-Objekt umgewandelt. Dabei werden die Informationen des Datenpakets um die ID und den Standort des Gateways sowie den Zeitstempel und die Signalempfangsstärke der Nachricht erweitert. Das Datenpaket wird anschließend an den LoRaWAN-Netzwerkserver in der *Cloud & Applikationsschicht* weitergeleitet. Dabei kommen das Netzwerkprotokoll MQTT und der Sicherheitsstandard TLS zum Einsatz.

Die am LoRaWAN-Netzwerkserver (*Cloud & Applikationsschicht*) empfangenen Datenpakete enthalten einen verschlüsselten LoRa-Payload. Dieser wird durch den Netzwerkserver decodiert. Der entschlüsselte Inhalt wird mit den restlichen Informationen der Übertragung in einem JSON-Objekt gespeichert. Das erstellte JSON-Objekt wird anschließend mithilfe von MQTT und dem Sicherheitsprotokoll TLS an das Back-End der Cloud-Plattform übertragen. Dieser Zwischenschritt ist notwendig, da die ausgewählte Cloud-Plattform über keine Funktionalitäten zur direkten Einbindung von LoRa-Gateways und der damit verbundenen Decodierung des Payloads verfügt. Eine Programmierung dieser Schnittstelle ist sehr kostenintensiv, weshalb auf den Open Source LoRaWAN-Netzwerkserver *ChirpStack* als Zwischenschritt zwischen Gateway und Cloud-Plattform zurückgegriffen wird.

Am Back-End ankommende JSON-Objekte werden durch die Datenverarbeitung der Cloud-Plattform direkt in ihrer Originalfassung gespeichert. Dieser Schritt erlaubt, dass auch noch zu einem späteren Zeitpunkt auf die Rohfassung der eingehenden Nachricht zugegriffen werden kann. Außerdem werden die ankommenden Daten, entsprechend der Vorgaben der implementierten Serviceumfänge, von diversen Microservices verarbeitet, aufbereitet und in den zugehörigen Datenbanken abgelegt. So kann die Bereitstellung der aufbereiteten Daten für den späteren Datenabruf durch den Anwender oder für weiterführende Verarbeitungsschritte durch das Back-End unabhängig vom zeitlichen Eingang der Daten realisiert werden. Auf die prototypisch implementierten Serviceumfänge und deren Überprüfung wird in Unterabschnitt 7.2.2 genauer eingegangen. Dabei fallen die Datenverarbeitung und -speicherung der umgesetzten Serviceumfänge in den Bereich der *Cloud & Applikationsschicht*. Für das Testgelände des Laborexperiments werden innerhalb der Cloud-Plattform vier sogenannte Geofences²³

²³ Ein Geofence ist eine virtuelle Begrenzung auf der Erdoberfläche, welche zur Auslösung von automatisierten Funktionalitäten verwendet wird.

eingrichtet (in Abbildung 7-4, grün). Diese virtuellen Begrenzungen werden genutzt, um positionsbasierte Funktionalitäten, bspw. die Wareneingangsbuchung, auslösen zu können.

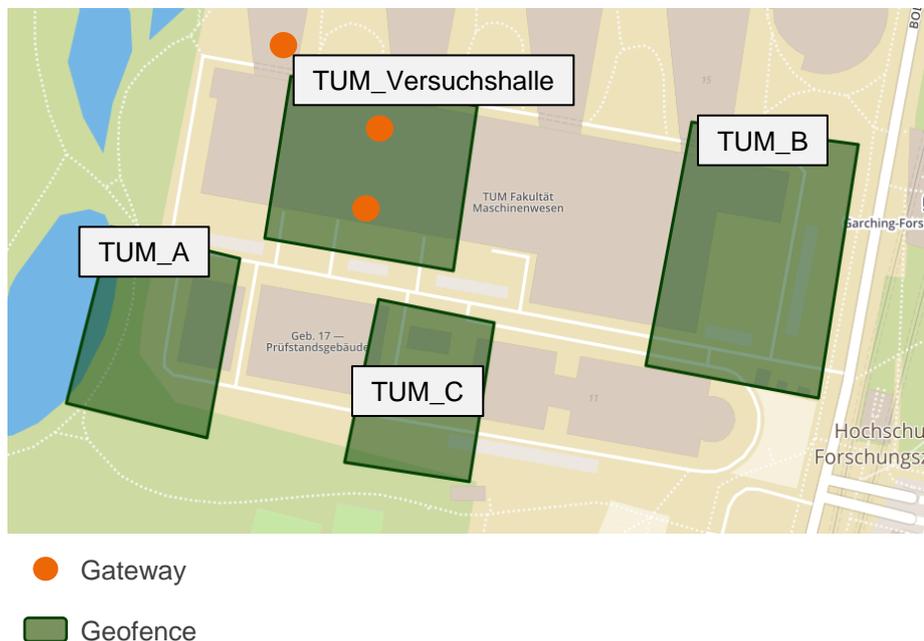


Abbildung 7-4: Messgelände für das Laborexperiment auf dem Gelände der TUM in Garching [Zei-2020b]

Die Cloud-Plattform verfügt darüber hinaus über ein webbasiertes Front-End, welches der *Clientschicht* zuzuordnen ist. Über diese Webanwendung kann der Anwender auf die umgesetzten Serviceumfänge und auf die aufbereiteten Daten zugreifen. Das Front-End visualisiert die Daten in Form eines Dashboards und besitzt darüber hinaus Funktionalitäten für Push-Benachrichtigungen. Ebenso ist ein Export von Rohdaten und Auswertungen in Tabellenform möglich.

Der Anwender, als Teil der *Anwenderschicht*, kann mit seinen Login-Daten von jedem internetfähigen Endgerät aus auf das Front-End der Cloud-Plattform und somit auf die Webanwendung mit der Visualisierung der umgesetzten Services zugreifen. Die Kommunikation verläuft über HTTPS und den Sicherheitsstandard TLS. Das Dashboard der Webanwendung ist so gestaltet, dass die jeweiligen Kerninformationen der Services klar aufgezeigt werden können. U. a. wurde für den Service *Zustandsüberwachung* ein Temperaturdiagramm entwickelt, welches es dem Anwender erlaubt, alle im Freien gelagerten imSLTs auf einen Blick zu erfassen. So können die im Winter nicht überdacht gelagerten imSLTs bei Bedarf vor der Bestückung zur Reinigung geschickt werden. Auf eine programmiertechnische Umsetzung der softwarespezifischen Schnittstellen und des erstellten Berechtigungskonzepts wird aufgrund des damit verbundenen hohen Aufwands und des geringen daraus resultierenden Mehrwerts für die prototypische Implementierung verzichtet.

Mit der vorgestellten prototypischen Implementierung werden im Folgenden mehrere Versuchsreihen durchgeführt, um Erkenntnisse zu sammeln bzgl. der Funktionsfähigkeit sowie bzgl. der Möglichkeiten und Einschränkungen der implementierten Fünfschichten-IoT-Architektur und der durch die Architektur zu realisierenden Services.

7.2.2 Umsetzung und Überprüfung der konzipierten Services

Zur Priorisierung der Serviceumfänge wurde vorab mit Experten aus dem Themenbereich Behältermanagement, ausgehend von den identifizierten Schwachstellen der Ist-Prozesse, eine Nutzwertanalyse durchgeführt. Die in Unterabschnitt 6.2.1 beschriebenen Abhängigkeiten zwischen den Services flossen dabei in die Bewertung mit ein. Die Ergebnisse der Nutzwertanalyse wurde bereits in [Gra-2020] veröffentlicht und werden deshalb nicht näher beschrieben. Aufbauend auf dieser Nutzwertanalyse wird eine Umsetzungsreihenfolge für die konzipierten Serviceumfänge festgelegt (siehe Tabelle 7-1).

Tabelle 7-1: *Umsetzungsreihenfolge für die prototypische Implementierung der konzipierten Services [in Anlehnung an Gra-2021]*

Service	Umsetzungsreihenfolge	Umgesetzt
aktuelle Positionen und Bestände	1	Ja
Zustandsüberwachung	2	Ja
digitales Behältermanagement	3	Ja
automatisierte Buchung	4	Ja
digitaler Schadensbericht	5	Ja
Pooling-System	6	Nein
Rekonfiguration	7	Nein
imSLT-Konfigurator	8	Nein
Reparatur	9	Nein
Auftragsverfolgung	10	Nein
Lebenszyklusüberwachung	11	Nein
Wartung	12	Nein
Recycling	13	Nein
Reinigung	14	Nein

Die Umsetzung und Überprüfung der einzelnen Services wird in den folgenden Absätzen analog zur dargestellten Umsetzungsreihenfolge beschrieben. Einige der Services werden im Rahmen der prototypischen Implementierung nicht umgesetzt, da der zusätzliche Aufwand durch die Experten als zu hoch eingeschätzt wird. Der Aufwand für

den Aufbau des Pooling-Systems und die Implementierung der IT-Schnittstellen sowie die stark begrenzte Anzahl an verfügbaren imSLTs und Modulen waren dabei ausschlaggebend. Darüber hinaus können die imSLTs im Behälterkreislauf zwischen dem Zulieferer und dem OEM aufgrund der bestehenden Behälterknappheit nicht für Versuche ausgeschleust werden. Ebenso werden die Einbindung und die Schulung zusätzlicher Dienstleister für den prototypischen Aufbau, bspw. für den Wartungs- oder Reparaturprozess, durch die Experten als nicht zielführend eingeschätzt. Auf Services, die aufgrund der Priorisierung nicht umgesetzt werden, wird in diesem Abschnitt nicht weiter eingegangen.

Service *aktuelle Positionen und Bestände*

Ziel des Service *aktuelle Positionen und Bestände* ist die Erfassung und Aufbereitung der aktuellen Positionsdaten der imSLTs. Als Grundlage für die Implementierung des Service dienen die durch das IoT-Modul errechneten GPS-Daten, welche intervallbasiert an die Cloud-Plattform übermittelt werden. Dabei betragen die Übertragungsintervalle technisch bedingt ein bis fünf Minuten. Die auf dieser Grundlage implementierten Ansichten innerhalb des Dashboards sollen dem Anwender einen Überblick über aktuelle Positionen und Bestände geben. Für die erste Darstellung werden die an der Cloud-Plattform ankommenden Positionsdaten der imSLTs als Punkte auf einer Karte und als Tabelle visualisiert (siehe Abbildung 7-5). Für die zweite Ansicht werden alle Behälter, die sich innerhalb eines vordefinierten Bereichs befinden, aufsummiert, um

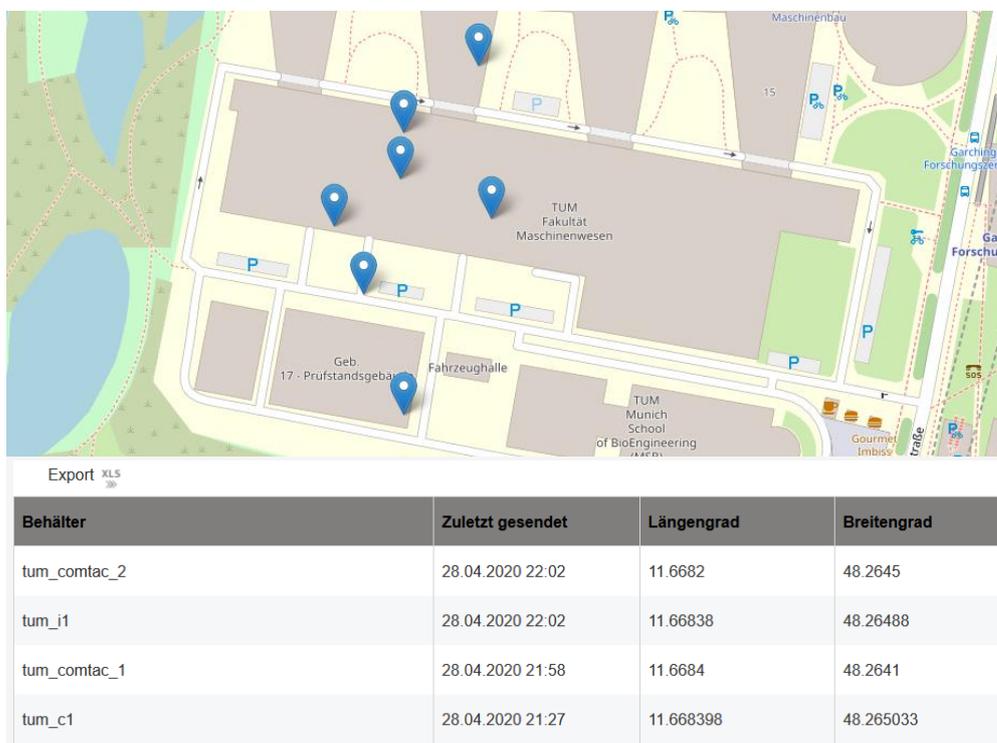


Abbildung 7-5: Visualisierung des Service *aktuelle Positionen und Bestände*

so den aktuellen Bestand zu jedem Bereich ausgeben zu können. Als technische Umsetzung der Bereichsbegrenzungen kommen die in Abbildung 7-4 (siehe Seite 150) dargestellten Geofences zum Einsatz, weshalb in den folgenden Beschreibungen die Begriffe „Geofence“ und „Bereich“ synonym verwendet werden. Alle durch den Service *aktuelle Positionen und Bestände* bereitgestellten Daten können als Tabelle für weitere Auswertungen exportiert werden.

Zur Überprüfung der implementierten Serviceumfänge wird der imSLT auf dem in Abbildung 7-4 dargestellten Testgelände über verschiedene Routen von einem Geofence zum nächsten transportiert. Für den Transport des Behälters wird ein Gabelstapler eingesetzt. Der imSLT wird in den einzelnen Geofences jeweils für mindestens 15 min abgestellt, bevor er zum nächsten Geofence weitertransportiert wird. Durch diesen Aufbau und Ablauf soll ein möglichst realitätsnaher Handhabungsprozess von imSLTs in einem kontrollierten Umfeld simuliert werden. Dabei werden 60 Versuche, welche sich aus den verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten von Fahrwegen und Zwischenstopps in den Geofences ergeben, durchgeführt. Während der Versuchsdurchführung wird überprüft, ob die aktuelle Position des imSLT und die aktuellen Bestände innerhalb der einzelnen Bereiche mithilfe der Weboberfläche überwacht werden können.

Die Versuche zeigen, dass eine Echtzeit-Ansicht des Transports auf der Weboberfläche aufgrund der technisch bedingt langen Übertragungsintervalle und der kurzen Teststrecke nicht möglich ist. Die Anzeige der aktuellen Position erfolgte, je nach Sendeintervall, mit einer Zeitverzögerung von ein bis fünf Minuten. Die Ankunft und das Abstellen im Geofence wurden in 55 von 60 Versuchen (91,7 %) erkannt und der aktuelle Bestand wurde entsprechend richtig angezeigt. Jedoch zeigte sich, dass die durch das GPS-Modul ermittelten Koordinaten während der 15 min Stillstandszeit sprunghaften Positionsveränderungen unterlagen. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass während des Stillstands des imSLT keine Sensorfusion mit der inertialen Messeinheit des IoT-Moduls zur Verbesserung der Lokalisierungsgenauigkeit möglich war.

Zur Quantifizierung dieses Koordinatensprungs während der Stillstandszeit und zur Ermittlung der technischen Limitationen des IoT-Moduls werden mehrere GPS-Messungen über einen längeren Zeitraum für einen ortsfesten imSLT durchgeführt. Während dieser Langzeitversuche wird der Behälter im Freien gelagert. In Abbildung 7-6 ist die Auswertung der durchgeführten Messungen zusammengefasst. Das Diagramm, eingeteilt in Intervalle, stellt die Abweichung der durch den imSLT übertragenen GPS-Koordinaten vom Referenzpunkt in Meter dar. Die Grafik zeigt, dass ohne Sensorfusion bei einem Geofence mit einem Radius von 30 m bzw. 45 m, nur 69,2 %

bzw. 85,8 % der durch den imSLT erfassten GPS-Koordinaten innerhalb dieses Radius liegen. Aufgrund dieser Ungenauigkeit würden so 30,8 % bzw. 14,2 % der ermittelten GPS-Koordinaten zu falschen Bestandsberechnungen auf der Plattform führen. Dementsprechend stimmten bei den Versuchen zum Service *aktuelle Positionen und Bestände* während der 15 min Stillstandsphase die durch das Webinterface angezeigten aktuellen Bestände oft nicht mit den realen Beständen überein.

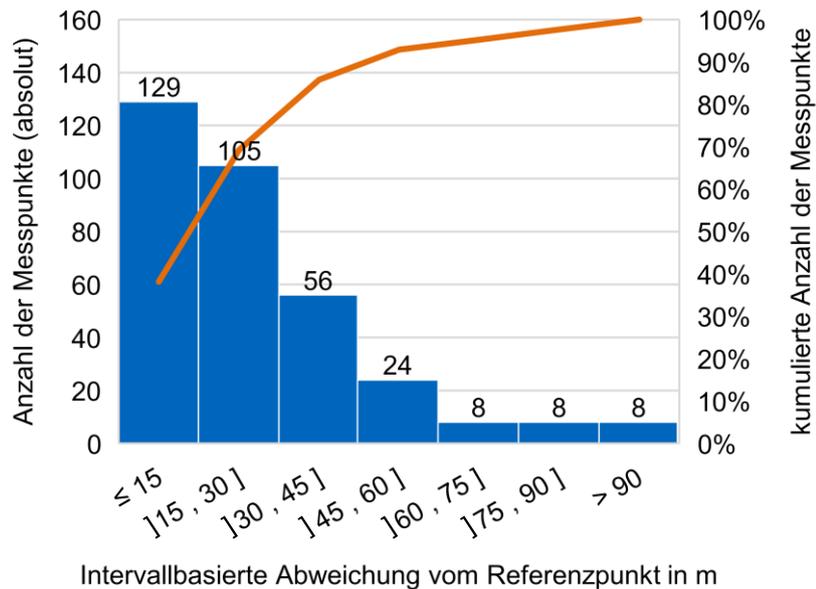


Abbildung 7-6: Paretdiagramm der GPS-Koordinatenabweichung vom Referenzpunkt bei einer Messdauer von 72 Stunden [Zei-2020b]

Diesem Problem sollte auf der Cloud-Plattform mit einer softwaretechnischen oder prozessbasierten Logik begegnet werden. So bietet sich die Implementierung eines Microservice an, der überprüft, ob die Berechnung der GPS-Koordinaten auf einer Sensorfusion beruht. Ist dies nicht der Fall, kann ein Mittelwert über mehrere GPS-Datensätze des betroffenen Behälters errechnet werden, um Koordinatensprüngen vorzubeugen. Alternativ kann mithilfe einer prozessbasierten Logik, bspw. anhand der Prozessabfolge und der Nachverfolgung der damit verbundenen Orte, überprüft werden, ob die Koordinaten plausibel sind. Außerdem kann eine entsprechende technologische Alternative zu GPS, bspw. eine POI-Lokalisierung, für diverse Einsatzszenarien eine genauere Alternative darstellen.

Die Versuche zur Überprüfung des Service *aktuelle Positionen und Bestände* zeigen, dass mithilfe der implementierten Fünf-Schichten-IoT-Architektur sowohl der Standort des imSLT als auch die Bestände der definierten Bereiche angezeigt bzw. exportiert werden können. Trotz der technisch bedingten Einschränkungen bzgl. der Genauigkeit der GPS-Koordinatenermittlung wird so die Transparenz innerhalb des Behälterkreislaufs in Bezug auf Bestände und Positionen der imSLTs erhöht. Für den späteren Pra-

xiseinsatz des Service *aktuelle Positionen und Bestände* sollte aber eine softwaretechnische oder prozessbasierte Logik implementiert werden, um eine verlässlichere Positionsbestimmung zu gewährleisten.

Service Zustandsüberwachung

Der Service *Zustandsüberwachung* ermöglicht es dem Anwender relevante Kennzahlen zur Umgebung oder zum imSLT selbst zu überwachen. Für die prototypische Implementierung wird dabei die Überwachung von zwei Zustandsgrößen, der Umgebungstemperatur und den Erschütterungen, umgesetzt. Die Grundlage hierfür bilden die Sensordaten des IoT-Moduls, welche intervallbasiert an die Cloud-Plattform übermittelt werden. Die Intervalle sind technisch bedingt auf ein bis fünf Minuten eingestellt. Die darauf aufbauende Implementierung und Überprüfung des Temperatur-Monitorings und der Erschütterungsüberwachung werden im Folgenden beschrieben.

Temperatur-Monitoring

Für die Temperaturüberwachung werden die an die Plattform übermittelten Temperaturdaten als zeitlicher Verlauf (siehe Abbildung 7-7, oben) und als Tabelle visualisiert. Zusätzlich wurde eine spezielle Ansicht entwickelt, welche es dem Anwender ermöglicht im Freien gelagerte Behälter auf einen Blick zu erkennen (siehe Abbildung 7-7, unten). Ebenso wird eine Grenzwertüberwachung eingerichtet, die den Anwender bei

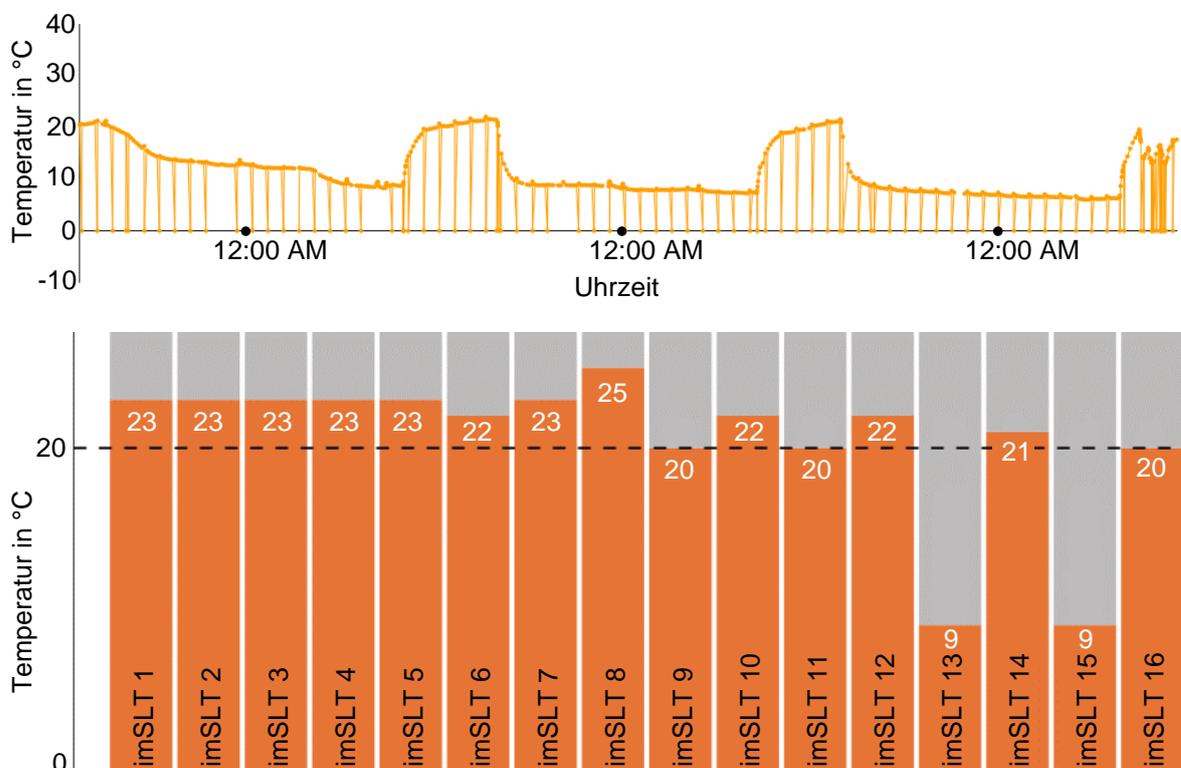


Abbildung 7-7: Visualisierung der Temperaturüberwachung: zeitlicher Temperaturverlauf für einen imSLT (oben) und Lagerbedingungen im Feldeinsatz (unten)

Unter- oder Überschreitung einer gewählten Temperatur benachrichtigt. Alle Daten des Temperatur-Monitorings können als Tabelle exportiert werden.

Mit den Versuchen zum Temperatur-Monitoring wird einerseits die Qualität der Temperaturdaten bewertet, andererseits wird überprüft, ob eine Benachrichtigung bei Unter- bzw. Überschreitung eines gewählten Grenzwertes ausgelöst wird. Für die Versuchsreihen wird der imSLT solange in der Versuchshalle (Raumtemperatur bei 21 °C) und auf der Außenfläche (Außentemperatur zwischen 6 °C und 8 °C) gelagert, bis die jeweilige Umgebungstemperatur erreicht wird.

Bei den Versuchsreihen wurde deutlich, dass die durch das IoT-Modul gemessenen Temperaturen sich nur langsam den Umgebungstemperaturen annäherten (siehe Abbildung 7-8). Sensorbedingt war eine maximale Temperaturänderung ΔT von 2,1 °C innerhalb von 5 min detektierbar. Auch wurde der Zielwert, die mit einem Infrarotthermometer gemessene Umgebungstemperatur, trotz langer Standzeiten nicht immer erreicht. Beide Versuchsergebnisse ließen sich auf die Messgenauigkeit der verbauten Sensoren (zwei unterschiedliche Hersteller) zurückführen.

Mit Eintreffen eines neuen Temperaturdatensatzes auf der Plattform wurden sowohl die Temperaturanzeige aktualisiert als auch der Grenzwert neu überprüft. Über- oder

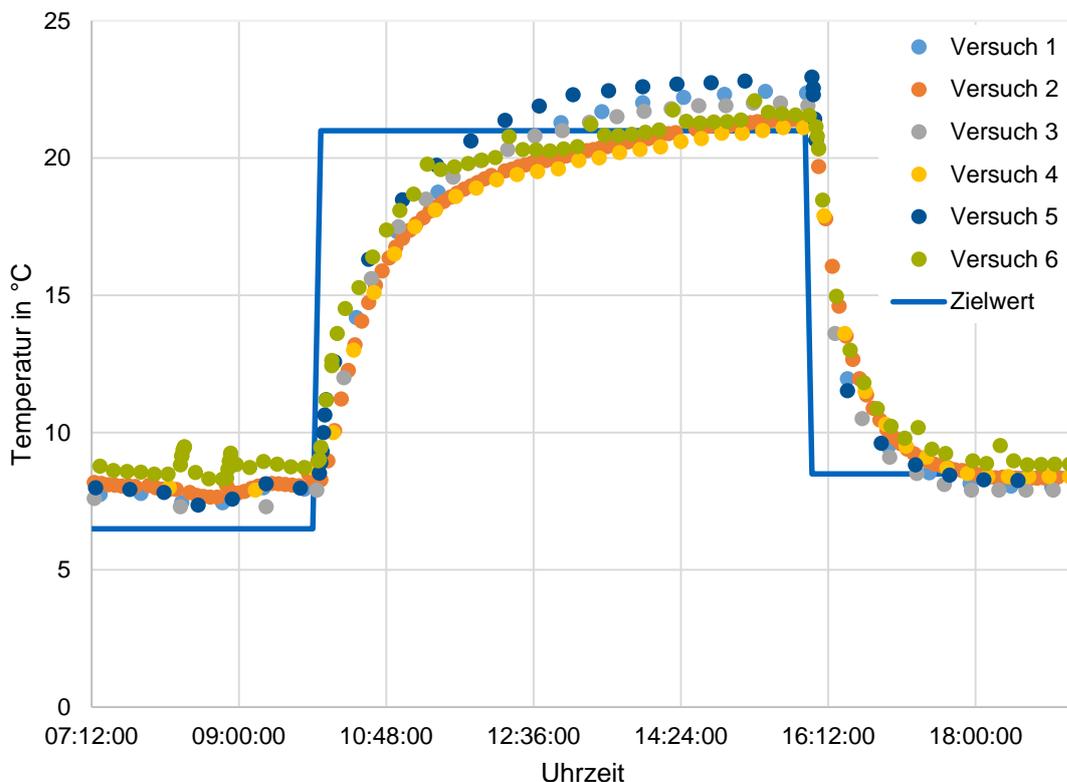


Abbildung 7-8: Auswertung der Versuche bzgl. des Temperatur-Monitorings bei unterschiedlichen Übertragungsintervallen des IoT-Moduls

unterschritt die gemessene Temperatur den bei 10 °C definierten Grenzwert (Grenzwertverletzung), wurde in allen Versuchen von der Cloud-Plattform eine E-Mail-Benachrichtigung ausgelöst. Diese beinhaltet neben der ID des imSLT auch dessen Position und den aktuell gemessenen Temperaturwert, der zur Auslösung der Benachrichtigung geführt hatte. Neben der Benachrichtigung konnten auch über das entwickelte Dashboard die imSLTs, die während des Feldexperiments im Freien gelagert wurden (Temperatur unter 10 °C), auf einen Blick erkannt werden (siehe Beispiel in Abbildung 7-7, unten, imSLT 13 und imSLT 15).

Die träge Temperaturmessung (siehe Abbildung 7-8) ist für den Einsatz in der Praxis gut geeignet, da auch der Behälter und die transportierten Bauteile eine gewisse Zeit benötigen, bis sie entsprechend abgekühlt oder aufgewärmt sind und so eine kritische Temperatur erreichen. Dementsprechend ist ein trägerer Temperatursensor von Vorteil. Ebenso wird bei einem kurzen Transport im Freien, bspw. im Winter, durch die langsamere Temperaturveränderung nicht direkt eine Grenzwertverletzung detektiert.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass durch die Fünf-Schichten-IoT-Architektur, konkret durch den Service *Zustandsüberwachung*, eine erhöhte Transparenz in Bezug auf Lagertemperaturen realisiert wird. Auch der Einsatz der ausgewählten Temperatursensoren erweist sich für den Praxiseinsatz als vorteilhaft, da so die unerlaubte Lagerung im Freien entdeckt und entsprechende Gegenmaßnahmen zur Gewährleistung der Lieferqualität ergriffen werden können.

Erschütterungsüberwachung

Die Erschütterungen des imSLT werden von den IoT-Modulen anhand der auftretenden Beschleunigungen in x-, y- und z-Richtung berechnet. Anschließend übermittelt das IoT-Modul die Erschütterungswerte ereignisbasiert an die Plattform. Innerhalb der Cloud-Plattform wurden für die Erschütterungsüberwachung zwei Visualisierungen umgesetzt. In der ersten Ansicht kann der Anwender die einzelnen Erschütterungen gezielt analysieren und sich den Erfassungsort der Erschütterung auf einer Karte anzeigen lassen (siehe Abbildung 7-9, oben). Eine zweite Ansicht stellt den zeitlichen Verlauf der Erschütterungen eines imSLT dar (siehe Abbildung 7-9, unten). Alle Erschütterungsdaten, inkl. der Position der Messung, können für weitere Auswertungen als Tabelle exportiert werden. Neben der Visualisierung und dem Export der Daten werden auf der Plattform die gemessenen Werte mit einem festgelegten Grenzwert verglichen. Bei dessen Überschreitung wird eine E-Mail-Benachrichtigung verschickt. Diese enthält die ID des betroffenen Behälters, den konkreten Messwert und den Ort der Erschütterung.

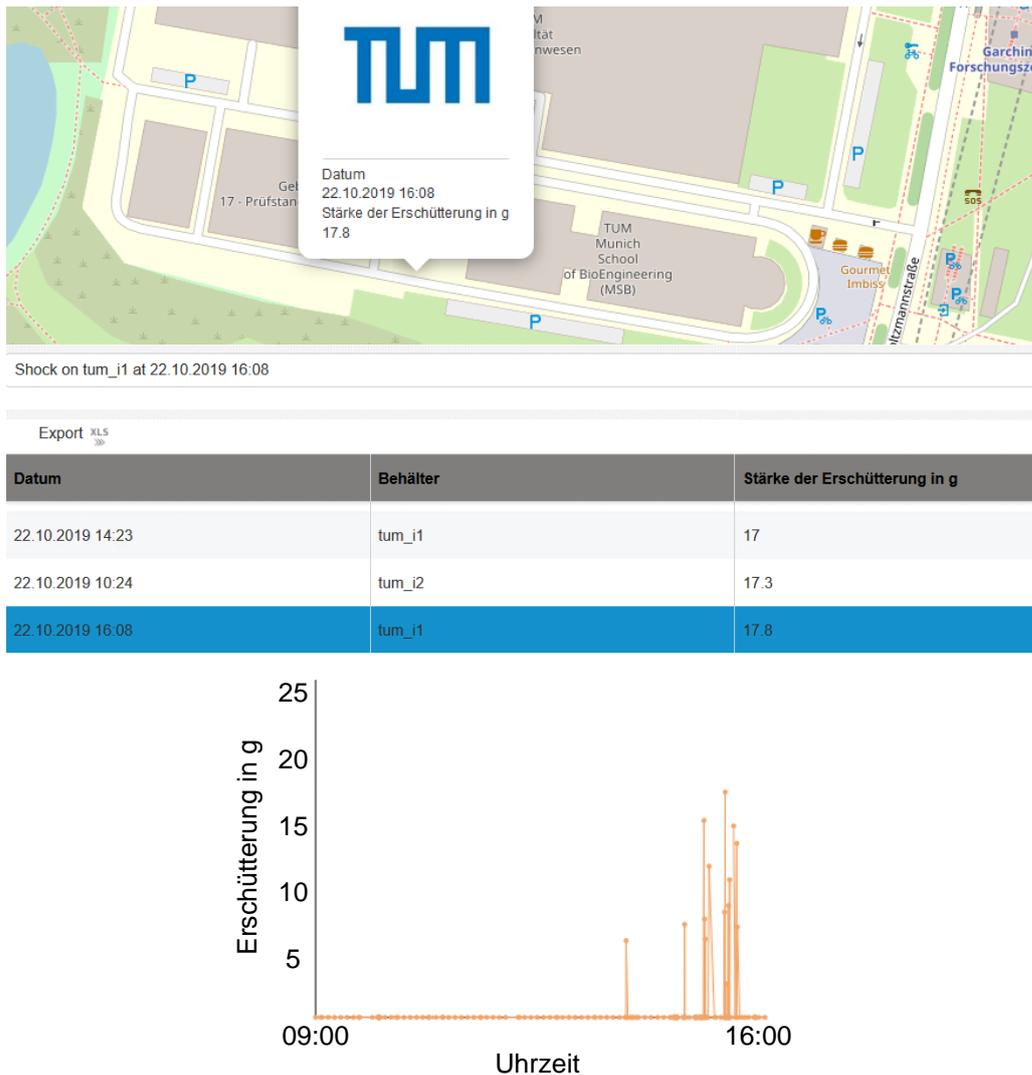


Abbildung 7-9: Visualisierung der Erschütterungsüberwachung: Kartenansicht für die detaillierte Analyse (oben) und zeitlicher Verlauf der Erschütterungen für einen imSLT (unten)

Die Versuchsreihen widmen sich den beiden Fragestellungen, ob Erschütterungen des imSLT richtig erkannt werden und, ob bei einer Grenzwertüberschreitung eine Benachrichtigung ausgelöst wird. Hierzu wird der imSLT mit IoT-Modulen sowohl am Seitenrahmen als auch am Unterboden ausgestattet. Als Alternative zur Integration in die Seitenverkleidung wird die Anbringung des IoT-Moduls am Seitenrahmen gewählt, um Vibrationsübertragungen auf das IoT-Modul durch die Blechverkleidung ausschließen zu können. Für die Versuche wird der imSLT mithilfe eines Gabelstaplers über unterschiedliche Untergründe wie etwa über Kopfsteinpflaster oder eine Kabelbrücke transportiert. Ebenfalls Inhalt der Versuchsreihen ist die kontrollierte Notbremsung mit anschließendem Herunterfallen des Behälters von den Gabelzinken. Die Experimente sollen unterschiedlich starke Erschütterungen bei einer praxisnahen Handhabung des imSLT simulieren.

Die Ergebnisauswertung der durchgeführten Laborexperimente zeigt, dass alle erzeugten Erschütterungen auf der Plattform eindeutig erkennbar sind und bei jeder Grenzwertüberschreitung eine E-Mail-Benachrichtigung versandt wurde. Durch die Versuche wird deutlich, dass der Anbringungsort des IoT-Moduls einen großen Einfluss auf die Stärke der gemessenen Erschütterungen hat (siehe Tabelle 7-2). Bei der Fahrt über das Kopfsteinpflaster erfasste das am Unterboden montierte IoT-Modul aufgrund der Schwingungen des Bodenblechs sehr hohe Beschleunigungswerte (zwischen 10,2 g und 17,3 g). Diese Messwerte lagen teilweise über den Werten, die beim Herunterfallen des imSLT (11,0 g bis 13,6 g) aufgezeichnet wurden. Deshalb eignet sich der Unterboden mit der direkten Übertragung der Schwingungen des Bodenblechs auf das IoT-Modul für den Praxiseinsatz nicht.

Hingegen lieferte das am Seitenrahmen angebrachte IoT-Modul während der durchgeführten Experimente stabile Messwerte bei auftretenden Erschütterungen. Basierend auf diesen Messungen konnten Rückschlüsse auf die Handhabung des Behälters gezogen werden. Entsprechend konnte ein für die Laborexperimente aussagekräftiger Grenzwert für unsachgemäßen Umgang bei 9 g (für den Anbringungspunkt Seitenrahmen) festgelegt werden. Bei den darauffolgenden Versuchen erfolgte zuverlässig bei jedem Herunterfallen des imSLT eine Benachrichtigung, welche dem Anwender Informationen über den Grad, den Zeitpunkt und den Ort der Erschütterung bereitstellte.

Tabelle 7-2: Gemessene Stärke der Erschütterung in Abhängigkeit der Anbringungspunkte des IoT-Moduls

Erschütterungen durch	Anbringungspunkt	gemessene Erschütterung	
		min.	max.
Asphalt	Seitenrahmen	-	-
	Unterboden	-	-
Kabelbrücke	Seitenrahmen	5,5 g	10,4 g
	Unterboden	6,4 g	13,8 g
Kopfsteinpflaster	Seitenrahmen	6,2 g	8,6 g
	Unterboden	10,2 g	17,3 g
Herunterfallen	Seitenrahmen	9,2 g	17,8 g
	Unterboden	11,0 g	13,6 g

Auch im Feldeinsatz wurde die Erschütterungsüberwachung bereits bei einem realen Vorfall verwendet. Dabei schleuste das Behältermanagement aufgrund der Messung einer sehr hohen Erschütterung (17,5 g) gezielt einen imSLT aus dem Behälterkreislauf aus. Bei der Überprüfung des betroffenen Behälters stellte sich heraus, dass dieser sehr stark beschädigt worden war. Aus Sicherheitsgründen durfte der imSLT ohne die benötigten Reparaturen nicht mehr für den weiteren Einsatz verwendet werden. Durch die nachträgliche Analyse der Erschütterungs- und Positionsdaten des imSLT

konnte das verantwortliche Unternehmen für diesen Schadensfall identifiziert werden. Somit konnten die Reparaturkosten eindeutig zugeordnet werden.

Die Versuche zur implementierten Erschütterungsüberwachung zeigen, dass durch die Fünf-Schichten-IoT-Architektur eine erhöhte Transparenz in Bezug auf die Behälterhandhabung realisiert werden kann. Aufkommende Probleme im Behälterkreislauf, u. a. die Beschädigung eines imSLT, können schneller und leichter identifiziert und Gegenmaßnahmen ergriffen werden. Außerdem gestaltet sich die Zuweisung von Verantwortlichkeiten durch die implementierten Serviceumfänge deutlich einfacher.

Service *digitales Behältermanagement*

Der Service *digitales Behältermanagement* zielt darauf ab, die auf der Cloud-Plattform vorhandenen Positionsdaten der imSLTs, vor allem in Bezug auf den zeitlichen Verlauf, zu analysieren. Deshalb wird der Service *digitales Behältermanagement* basierend auf den Daten des Service *aktuelle Positionen und Bestände* umgesetzt. Die erstellten Ansichten dienen dazu, dem Anwender die Auswertung der Positionsverläufe zu vereinfachen. Konkret kann sich der Anwender den Positionsverlauf der imSLTs in Form einer Karte (siehe Abbildung 7-10, oben) oder als Tabelle darstellen lassen, um Abweichungen von der Transportroute erkennen zu können. Der sich über die Zeit verändernde Bestand wird für jeden Bereich tabellarisch visualisiert (siehe Abbildung 7-10, unten).

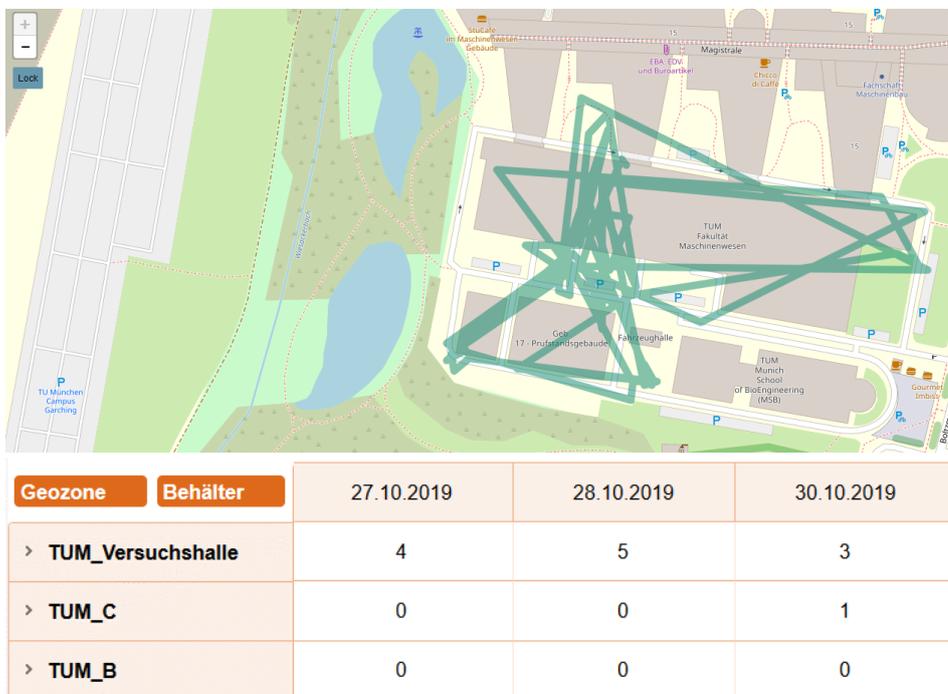


Abbildung 7-10: *Minütlicher Positionsverlauf eines imSLT (oben) und zeitlicher Verlauf der Bestände je Geofence auf Tagesbasis (unten)*

Der Service *digitales Behältermanagement* berechnet darüber hinaus für jeden imSLT die Standzeiten pro Bereich und speichert diese in den zugehörigen Datenbanken ab. Die aktuellen Standzeiten aller imSLTs in einem Bereich und der bereichsübergreifende Verlauf der Standzeiten für einen imSLT können als Tabelle visualisiert oder direkt exportiert werden. So ist es möglich Unstimmigkeiten im Behälterkreislauf, z. B. vergessene Leergutbestände, aufzudecken. Weiter kommen zwei Grenzwertüberwachungen, bei Überschreitung einer maximalen Standzeit und bei Unterschreitung eines minimalen Bestands, mit einer Benachrichtigungsfunktion zum Einsatz.

Ziel der Versuche zum Service *digitales Behältermanagement* ist es, die umgesetzten Serviceumfänge, basierend auf den durch den Service *aktuelle Positionen und Bestände* bereitgestellten Daten, zu überprüfen. Dementsprechend dienen diese Versuchsdaten als Grundlage der Bewertung. So werden die Fragestellungen, ob die Standzeiten richtig berechnet und bei deren Grenzwertüberschreitung eine Warnmeldung ausgegeben wird, parallel zu den Experimenten zum Service *aktuelle Positionen und Bestände* überprüft.

Im Verlauf der durchgeführten Versuche fasste der durch die Cloud-Plattform ausgewertete Routenverlauf (siehe Abbildung 7-10, oben) die empfangenen GPS-Koordinaten des imSLT zeitlich zusammen. Während des Transports des Behälters zeigte sich, dass, dank der Sensorfusion, der Routenverlauf örtlich sehr nahe an den tatsächlichen Positionen des Behälters lag. Allerdings konnte aufgrund des Sendeintervalls des IoT-Moduls (1 min bis 5 min) in Verbindung mit der kurzen Transportstrecke und somit der geringen Dichte an GPS-Koordinaten auf dieser Strecke nicht immer die exakte Transportroute des Gabelstaplers identifiziert werden.

Auch bei der Auswertung des Bestandverlaufs stellte die technische Einschränkung des GPS-Moduls während der 15 min Stillstandszeit die Cloud-Plattform vor Herausforderungen. So kam es wiederholt zu kurzen virtuellen Positionssprüngen des imSLT, welche dazu führten, dass die Bestände kurzzeitig inkorrekt berechnet wurden. Allerdings wurden bei Eintritt in den Geofence die Bestände bei 55 von 60 Versuchen richtig geändert. Während der 15 min Stillstandszeit wurden bei 60 Versuchen 23 kurzzeitige GPS-Koordinatenveränderungen (aufgrund der Ungenauigkeit der Positionsbestimmung des IoT-Moduls) festgestellt, die außerhalb des richtigen Geofences lagen. Folglich wurden während dieser 23 Positionsveränderungen die Bestände von der Plattform kurzzeitig falsch berechnet.

Bei jeder Unterschreitung des definierten Minimalbestands (Grenzwert) wurde von der Cloud-Plattform eine E-Mail-Benachrichtigung verschickt, auch wenn der Grenzwert

aufgrund einer ungenauen Positionsbestimmung nur kurzzeitig unter- oder überschritten wurde. Dies zeigte, dass die Benachrichtigungsfunktionen richtig umgesetzt wurden.

Einen besonders starken Einfluss hatten diese rein virtuellen Koordinatensprünge während der 15 min Stillstandsphase bei der Berechnung der Standzeiten. Prinzipiell wurde die Standzeit der einzelnen imSLTs berechnet, indem die Verweildauer pro Position für alle Positionen, die in einem Geofence liegen, aufsummiert wurde. Für die Versuche wurde eine Verweildauer von 15 min pro Geofence angesetzt, wodurch sich, bedingt durch das Übertragungsintervall des IoT-Moduls (1 min bis 5 min), ein Zielbereich für die berechnete Standzeit von 10 min bis 15 min ergab. Die Versuchsergebnisse sind in Abbildung 7-11 dargestellt und zeigen, dass bei 23 Versuchen aufgrund einer sprunghaften Veränderung der Koordinaten während der Stillstandszeit eine zu geringe Standzeit berechnet wurde. Bei Versuch 4 hingegen wurde eine Standzeit von 24 min berechnet. Diese lang andauernde Standzeit lässt sich auf den kurzzeitigen Ausfall eines IoT-Moduls zurückführen. Somit konnten keine neuen GPS-Koordinaten von diesem Modul übermittelt werden.

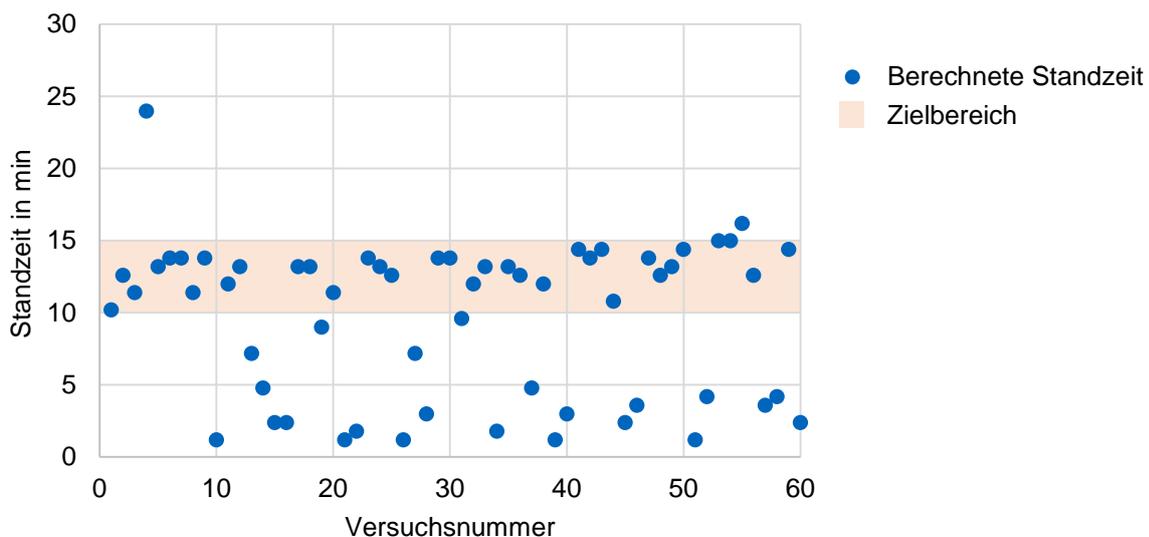


Abbildung 7-11: Durch die Cloudplattform berechnete Standzeiten für den im Geofence abgestellten imSLT

Um die Benachrichtigungsfunktion bei einer Grenzwertüberschreitung zu überprüfen, wurde die maximal erlaubte Standzeit während der Versuchsdurchführung auf 10 min begrenzt. Die Cloud-Plattform verschickte für 37 von 37 Versuchen, bei denen der Grenzwert überschritten wurde, eine E-Mail-Benachrichtigung. Die Benachrichtigung enthielt den jeweiligen Bereich, die ID des imSLT und die aktuelle Standzeit des Behälters.

Die Auswertung der Versuche zeigt, dass die grundlegenden Funktionen des Service *digitales Behältermanagement* mithilfe der Fünf-Schichten-IoT-Architektur umgesetzt werden können. So kann, trotz der technischen Einschränkungen durch das IoT-Modul, die Transparenz innerhalb des Behälterkreislaufs in Bezug auf Positionsverläufe, Bestände und Standzeiten der imSLTs erhöht werden. Ebenso können basierend auf den Positionsdaten die Verantwortlichkeiten eindeutig zugeordnet werden und es ist möglich durch die Grenzwertüberwachung bei drohenden Unterbeständen vorzeitig zu reagieren. Der technisch bedingten Ungenauigkeit, genauer genommen dem sprunghaften Wechsel von Positionen bei Stillstand des imSLT, kann softwaretechnisch oder mithilfe einer prozessbasierten Logik begegnet werden.

Service automatisierte Buchung

Der Service *automatisierte Buchung* fokussiert die automatische Durchführung von Behälterbewegungsbuchungen. Dieser Service basiert ebenfalls auf den Daten des Service *aktuelle Positionen und Bestände*. Für die prototypische Umsetzung wird eine erfolgreich durchgeführte Buchung mit einer E-Mail-Benachrichtigung simuliert. Dementsprechend wird, anstatt der durchzuführenden Buchung, jedes Mal eine Benachrichtigung verschickt. Diese beinhaltet alle für eine Behälterbuchung benötigten Daten: die ID des imSLT, den Namen des Bereichs, das Datum und die Uhrzeit des Ein- oder Austritts.

Ziel der Versuche ist es zu überprüfen, ob eine automatisierte Buchung des Bewegungsverlaufs anhand der Positionsdaten, etwa durch einen Eintritt in bzw. einen Austritt aus einem Geofence, durchgeführt werden kann. Für die Versuchsreihen wird ein imSLT auf verschiedenen Transportrouten vom Geofence TUM_Versuchshalle zum Geofence TUM_C (siehe Abbildung 7-4, Seite 150) und in umgekehrter Richtung transportiert. Dabei wird, um eine größere Anzahl von gleichzeitig durchgeführten Buchungen zu simulieren, der imSLT mit sechs IoT-Modulen ausgestattet. Dementsprechend soll die Cloud-Plattform bei jedem Eintritt des imSLT in einen neuen Geofence sechs E-Mail-Benachrichtigungen auslösen. Nach Eintritt in den Geofence wird der Behälter analog zu den Versuchen bzgl. des Service *aktuelle Positionen und Bestände* 15 min in der Mitte des Geofences abgestellt. Die Anzahl der ausgelösten Benachrichtigungen wird anschließend mit der tatsächlichen Anzahl der durchgeführten Eintritten verglichen, um den simulierten Buchungsprozess zu bewerten.

Bei den Versuchen wurden 58 der 60 (96,7 %) durchgeführten Eintritte in die gewählten Geofences anhand der durch die IoT-Module übermittelten GPS-Koordinaten korrekt erkannt. Entsprechend wurde die Benachrichtigung für alle sechs IoT-Module fast gleichzeitig mit dem Eintritt in das Geofence ausgelöst. Bei zwei Versuchen konnte ein IoT-Modul keine gültigen GPS-Koordinaten ermitteln, da die Verbindung zu den GPS-

Satelliten kurzzeitig unterbrochen worden war. Wie auch bei den anderen Versuchsreihen veränderten sich die an der Plattform ankommenden Koordinaten sprunghaft während der 15 min Stillstandszeit des imSLT. Dies hatte zur Folge, dass während dieser Stillstandsphase der simulierte Buchungsvorgang mehrmals oder auch fehlerhaft durchgeführt wurde. Deshalb empfiehlt es sich auch für den Service *automatisierte Buchung* die bereits beschriebenen softwaretechnischen oder prozessbasierten Logiken zu implementieren, um die technischen Einschränkungen des IoT-Moduls zu umgehen. Sobald der imSLT wieder aufgenommen und zum nächsten Geofence transportiert wurde, verbesserte sich die Genauigkeit der Positionsbestimmung, wodurch der Buchungsvorgang erneut korrekt simuliert werden konnte. Eine Sensorfusion war aufgrund der Bewegung wieder möglich.

Die Überprüfung des Service *automatisierte Buchung* zeigt, dass die automatische Buchung von Behälterbewegungen prinzipiell mithilfe der Fünf-Schichten-IoT-Architektur durchgeführt werden kann. Jedoch eignen sich die für die prototypische Implementierung eingesetzten Technologien nur bedingt, da im Praxiseinsatz, bei einer Vielzahl von Buchungen mit einer 3,3 % Fehlerquote, eine zu große Abweichung zwischen realem und gebuchtem Bestand entstehen würde. Unabhängig von den technischen Einschränkungen ist festzustellen, dass eine automatische Buchung besonders bei einer größeren Anzahl von gleichzeitig durchzuführenden Behälterbuchungen eine sinnvolle Automatisierung von manuellen Prozessschritten darstellt.

Service *digitaler Schadensbericht*

Der Service *digitaler Schadensbericht* hat zum Ziel, entstandene Schäden direkt am beschädigten imSLT vor Ort zu dokumentieren, um diese später auswerten zu können. Deshalb wurde für den Service *digitaler Schadensbericht* eine App zur Aufnahme von Schadensberichten entwickelt (siehe Abbildung 7-12). Diese erlaubt dem Anwender den beschädigten Behälter über den Scan des am Behälter angebrachten QR-Codes (die ID des imSLT) auszuwählen, um anschließend den Schadensbericht anzufertigen. Nach dem erfolgreichen Scan werden sowohl die aktuelle Position des imSLT als auch dessen Sensorwerte in der App visualisiert. Für den ausgewählten Behälter kann daraufhin der Schaden anhand der vorgegebenen Kategorien eingeordnet und eine kurze Schadensbeschreibung formuliert werden. Der digital verfasste Schadensbericht wird nach dessen Fertigstellung an die Cloud-Plattform übermittelt. Über die Webanwendung der Cloud-Plattform können alle erstellten Schadensberichte mithilfe eines einfachen Dashboards visualisiert werden (siehe Abbildung 7-13).

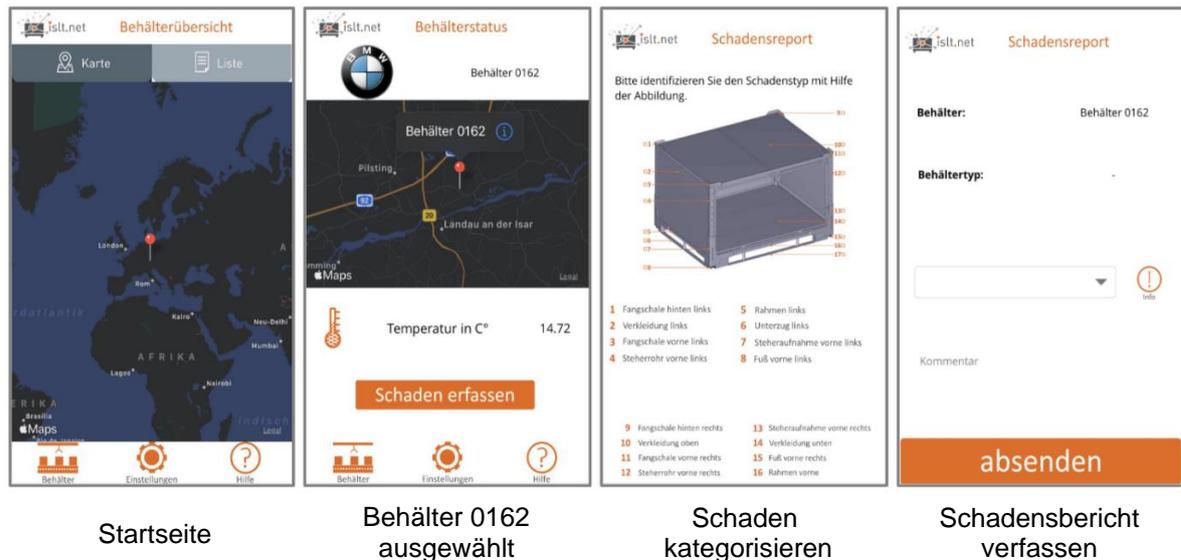


Abbildung 7-12: App zur Aufnahme des Schadensberichts [in Anlehnung an Gra-2021]

Für die Laborexperimente zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit des Service *digitaler Schadensbericht* werden von Probanden mehrere fiktive Schäden an unterschiedlichen Behältern aufgenommen. Bei jeder Versuchsdurchführung wird als erstes der QR-Code gescannt, um den Schadensbericht dem richtigen Behälter zuzuordnen. Anschließend werden die Schäden kategorisiert. Der Bericht wird inkl. einer kurzen Schadensbeschreibung an die Plattform übermittelt. Dort wird im Anschluss die Visualisierung der aufgenommenen Schadensberichte überprüft.

Sowohl die Erfassung der ID als auch die Dokumentation des Schadensberichts über die App funktionierten fehlerfrei. Alle Abläufe konnten mithilfe der App auch von unerfahrenen Probanden ohne Probleme durchgeführt werden. Die übermittelten Schadensberichte waren ohne Zeitverzögerung über das Webinterface einsehbar. Bei neu eingetroffenen Datensätzen erfolgte eine Benachrichtigung des Anwenders. Von den Probanden wurde angemerkt, dass die Erweiterung des Schadensberichts um eine Fotoaufnahme des Schadens die Auswertung und Reparaturplanung erleichtern würde.

Damage Report Export XLS

Behälter	Datum	gemeldet von	Schadenstyp	Kommentar
tum_i1	13/11/2019	Johannes Zeiler	4 Steherrohr vorne links	Querstrebe nicht auswählbar
tum_i1	13/11/2019	Johannes Zeiler	6 Unterzug links	Drop-down geht nur bis 25
tum_c1	13/11/2019	Johannes Zeiler		Probleme mit dem drop-down
tum_c1	13/11/2019	Johannes Zeiler	7 Steheraufnahme vorne links, 4 Steherrohr vorne links	Behälter nicht reparaturfähig
tum_c1	13/11/2019	Johannes Zeiler		IoT device und Innenleben nicht auswählbar
tum_comtac_1	13/11/2019	Johannes Zeiler	18 Steherrohr hinten rechts, 25 Verkleidung hinten	Längsstreben nicht auswählbar

Abbildung 7-13: Visualisierung der aufgenommenen Schadensberichte

Die Auswertung des Laborexperiments zeigt, dass durch den Service *digitaler Schadensreport* ein großer Transparenzgewinn bei kleinem Mehraufwand möglich ist. Momentan werden innerhalb des Behälterkreislaufs kaum Beschädigungen digital dokumentiert, da dieser Prozess sehr aufwendig ist. Dieser Problemstellung begegnet die schnelle und einfache Dokumentationsmöglichkeit über die erstellte App. Darüber hinaus kann mithilfe der App ein standardisierter und einfacher Vorgang zur Aufnahme und Digitalisierung von Schadensberichten verwirklicht werden. Für den Praxiseinsatz sollte die implementierte Visualisierung auf der Webplattform (siehe Abbildung 7-13) in Bezug auf Usability und Informationsdarstellung angepasst werden, um schneller wichtige Zusammenhänge erkennen zu können.

7.2.3 Zusammenfassung der Evaluationsergebnisse

Wie die durchgeführten Experimente zeigen, erlaubte der implementierte Prototyp der konzeptionierten Fünf-Schichten-IoT-Architektur für beide Einsatzszenarien sowohl für den aktiven Behälterkreislauf zwischen OEM und Zulieferer als auch beim Einsatz im Labor prozessrelevante Daten zu sammeln und diese gebündelt als Services über die Cloud-Plattform dem Anwender bereitzustellen. Dabei wurde eine weitgehend sichere und zuverlässige Datenerfassung, -verarbeitung und -übertragung vom imSLT auf der Shopfloor-Ebene bis zur Visualisierung in der Webanwendung realisiert.

Auch die Funktionsfähigkeit der durch die Architektur zu realisierenden Serviceumfänge konnte trotz der technischen Einschränkungen des IoT-Moduls überprüft werden. So konnte mithilfe der durchgeführten Versuche die Umsetzbarkeit der Fünf-Schichten-IoT-Architektur, die erzielbaren Mehrwerte und die technisch bedingten Einschränkungen des implementierten Prototyps aufgezeigt werden. Ebenso bestätigte der erfolgreiche Feldeinsatz die Umsetzbarkeit der Architektur und des damit verbundenen Service-Systems auch unter Realbedingungen.

Somit lässt sich festhalten, dass das entwickelte Architekturkonzept für das unternehmensübergreifende Service-System mit imSLTs sowohl im Labor als auch im realen Umfeld anwendbar ist. Die Fünf-Schichten-IoT-Architektur erlaubt dabei die Potenziale von imSLTs zu erschließen und diese den beteiligten Unternehmen als Service bereitzustellen. Noch bestehende technisch bedingte Einschränkungen sollten mit einer software- oder prozessbasierten Logik ausgeglichen werden.

7.3 Überprüfung der Anforderungserfüllung

Dieser Abschnitt widmet sich der Überprüfung der in Abschnitt 5.3 aufgestellten Anforderungen an die Architektur des unternehmensübergreifenden Service-Systems. Als Grundlage der Evaluierung der Anforderungserfüllung dienen die durchgeführten Experimente und ein merkmalsbasierter Vergleich. In Tabelle 7-3 werden die eingangs erarbeiteten Anforderungen qualitativ bzgl. der erzielten Anforderungserfüllung durch das erstellte Architekturkonzept und den implementierten Prototyp bewertet (Legende: „●“ vollumfänglich erfüllt, „◐“ wesentliche Aspekte erfüllt, „○“ nicht erfüllt und „–“ nicht umgesetzt). Neben dieser qualitativen Bewertung wird für jede Anforderung auch die Anforderungserfüllung beschrieben.

Tabelle 7-3: Überprüfung und Diskussion der Anforderungserfüllung

Nr.	Anforderung Kurzbeschreibung der Anforderungserfüllung	Anforderungserfüllung	
		Konzept	Prototyp
A01	Der Einsatz eines modularen Sonderladungsträgers mit wiederverwendbaren Modulen muss realisiert werden.	●	●
	Der Einsatz und Lebenszyklus eines imSLT und seiner wiederverwendbaren Module wird in der untersten Schicht der Fünf-Schichten-IoT-Architektur dargestellt (vgl. Unterabschnitt 6.4.1). Dabei sind die Modularität und die Intelligenz des imSLT Ausgangsbasis für das konzipierte Service-System. Der physische imSLT wurde für die prototypische Implementierung in geringer Stückzahl produziert, montiert und erfolgreich in einen Behälterkreislauf eingeschleust (vgl. Unterabschnitt 7.2.1). Somit wird die Anforderung sowohl durch das Konzept als auch durch den Prototyp vollständig erfüllt.		
A02	Ein Pooling von modularen Sonderladungsträgern und deren standardisierten Modulen muss zur Verfügung gestellt werden (u. a. zur Steigerung der Verfügbarkeit oder für die Rückgabe von modularen Sonderladungsträgern).	●	–
	Für Anforderung A02 wurde der Service <i>Pooling-System</i> konzipiert, welcher die Bereitstellung von imSLTs und deren Module aus einem Pool vorsieht, um eine Mengenflexibilität während des Nutzungszyklus eines imSLT-Typen zu gewährleisten (vgl. Unterabschnitt 6.2.1). Die zur Realisierung des Service benötigten Funktionsumfänge, Daten und Ressourcen werden durch die Fünf-Schichten-IoT-Architektur strukturiert und deren Zusammenhänge dargestellt (vgl. Abschnitt 6.4).		

Nr.	Anforderung Kurzbeschreibung der Anforderungserfüllung	Anforderungserfüllung	
		Konzept	Prototyp
A03	Eine Möglichkeit zur webbasierten Konfiguration eines modularen Sonderladungsträgers und Angaben zur Verfügbarkeit der einzelnen Module müssen gegeben sein.	●	—
	Basierend auf der Fünf-Schichten-IoT-Architektur ermöglicht der konzipierte Service <i>imSLT-Konfigurator</i> dem Anwender die webbasierte Konfiguration des imSLT (vgl. Unterabschnitt 6.2.1). Konkret erleichtert der Service den Entwicklungsprozess durch die einfache Konfiguration des gewünschten Ladungsträgers aus standardisierten Modulen. Das Architekturkonzept legt die für den Einsatz des Service benötigten Funktionen, Datensätze und physischen Ressourcen fest. So können u. a. in Kombination mit den Daten des Service <i>Pooling-System</i> die Lagerbestände der verfügbaren Module während der Konfiguration angezeigt werden (vgl. Abschnitt 6.4).		
A04	Der aktuelle Auftragsstatus der Behälterherstellung muss jederzeit einsehbar sein.	●	—
	Durch den konzipierten Service <i>Auftragsverfolgung</i> (vgl. Unterabschnitt 6.2.1) und dessen Einbindung in die Fünf-Schichten-IoT-Architektur kann der aktuelle Status der Behälterherstellung durch das System weitgehend automatisch bestimmt und für den Anwender visualisiert werden. So kann der Anwender, bspw. nach erfolgreichem Login auf dem Webserver, den aktuellen Status jederzeit einsehen. Alle benötigten Komponenten für die Umsetzung des Service sind im Architekturkonzept vorgesehen (u. a. im konzeptionellen Datenmodell).		
A05	Eine digital nachvollziehbare Rekonfiguration (Umbau) der modularen Sonderladungsträger muss ermöglicht werden.	●	—
	Für Rekonfigurationen von imSLTs wurde der Service <i>Rekonfiguration</i> konzipiert (vgl. Unterabschnitt 6.2.1). Dieser nutzt die Funktionsumfänge des Service <i>Pooling-System</i> . Neben dem physischen Umbau der imSLTs erlaubt der Service über die eindeutige ID der Module und der damit verbundenen Erfassungsprozesse eine digitale Rückverfolgbarkeit von Montage- und Demontageprozessen. Dabei werden die Daten entsprechend dem erstellten konzeptionellen Datenmodell miteinander verknüpft, um die eindeutige Nachvollziehbarkeit des Einsatzes und der Rekonfiguration zu gewährleisten (vgl. Abschnitt 6.3).		

Nr.	Anforderung Kurzbeschreibung der Anforderungserfüllung	Anforderungserfüllung	
		Konzept	Prototyp
A06	Die Möglichkeit zur digitalen Dokumentation eines Schadensberichts für einen modularen Sonderladungsträger muss gegeben sein.	●	●
	Mithilfe des Service <i>digitaler Schadensbericht</i> können die Anwender direkt am Behälter vor Ort, bspw. mit einem Tablet, einen digitalen Schadensbericht erstellen (vgl. Unterabschnitt 6.2.1). Dabei kann der Schaden kategorisiert und der Bericht, über die Erfassung der ID des Behälters, direkt dem richtigen imSLT zugeordnet werden. Nach Abschluss der Dokumentation wird der Bericht für spätere Auswertungen in einer zentralen Datenbank gespeichert. Für die prototypische Umsetzung wurde eine App zur Erstellung des digitalen Schadensberichts entwickelt, welche es auch unerfahrenen Probanden erlaubt, einen Schadensbericht für den imSLT digital und vollständig zu dokumentieren (vgl. Unterabschnitt 7.2.2).		
A07	Digital nachvollziehbare Wartungsvorgänge (physische Wartung und digitale Informationen zur Wartung) müssen realisiert werden.	●	—
	Mithilfe des Service <i>Wartung</i> und der damit verbundenen Daten und Ressourcen innerhalb der Fünf-Schichten-IoT-Architektur wird die physische Wartung des imSLT und die digitale Dokumentation der Wartungstätigkeiten in Form eines Wartungsberichts ermöglicht (vgl. Unterabschnitt 6.2.1 und Abschnitt 6.4). Die erfassten Daten werden dem Anwender über eine Web- oder Softwareanwendung bereitgestellt. Alle für den Einsatz des Service benötigten Funktionsumfänge sind innerhalb des Architekturkonzepts berücksichtigt.		
A08	Ein digital nachvollziehbarer Reparaturvorgang (physische Reparatur und digitale Informationen zur Reparatur) muss gewährleistet sein.	●	—
	Für die Reparatur von imSLTs wurde der Service <i>Reparatur</i> erstellt (vgl. Unterabschnitt 6.2.1). Dieser gewährleistet, basierend auf der Fünf-Schichten-IoT-Architektur, neben der physischen Reparatur des imSLT (über den Austausch von Modulen) die digitale Nachvollziehbarkeit aller Reparaturarbeiten über den eingebundenen Reparaturbericht. Diese digitale Dokumentation der Reparatur wird durch die eindeutige Modul-ID unterstützt und ist über eine Webanwendung möglich. Alle für den Service benötigten Funktionen, Daten und Ressourcen werden durch das Architekturkonzept festgelegt.		
A09	Digital nachvollziehbare Reinigungsvorgänge (physische Reinigung und digitale Informationen zur Reinigung) sollen ermöglicht werden.	●	—
	Eine digital nachvollziehbare Reinigung wird durch den Service <i>Reinigung</i> ermöglicht (vgl. Unterabschnitt 6.2.1). Dieser erlaubt neben der physischen Reinigung die digitale, in der Regel automatische Dokumentation von Reinigungsvorgängen. Die benötigten Daten werden durch das konzeptionelle Datenmodell strukturiert und sind neben den benötigten Funktionsumfängen und Ressourcen den einzelnen Schichten der Fünf-Schichten-IoT-Architektur zugeordnet.		

Nr.	Anforderung Kurzbeschreibung der Anforderungserfüllung	Anforderungserfüllung	
		Konzept	Prototyp
A10	Ein digital nachvollziehbares Recycling (physisches Recycling und Informationen wie bspw. die CO ₂ -Bilanz) der Module muss vorgesehen werden.	●	—
	Der Service <i>Recycling</i> vereint die benötigten Funktionalitäten für die physische Durchführung und die digitale Dokumentation des Recyclingvorgangs (vgl. Unterabschnitt 6.2.1). Der auf Modulbasis erfasste Recyclingbericht kann über die Verknüpfungen im konzeptionellen Datenmodell einem imSLT zugeordnet werden. Die Fünf-Schichten-IoT-Architektur stellt dabei die benötigten Ressourcen bereit (vgl. Abschnitt 6.4).		
A11	Die aktuellen Positionen der modularen Sonderladungsträger im Behälterkreislauf müssen jederzeit zur Verfügung stehen (Tracking).	●	◐
	Zur Erfüllung von Anforderung A11 wurde der Service <i>aktuelle Positionen und Bestände</i> erstellt. Er ermöglicht die Erfassung und Aufbereitung der aktuellen Positionsdaten der imSLTs (vgl. Unterabschnitt 6.2.1). Die zur Realisierung des Service benötigten Funktionsumfänge, Daten, Ressourcen und die zugehörigen Kommunikationsabläufe werden durch die Fünf-Schichten-IoT-Architektur festgelegt (vgl. Abschnitt 6.4). Die darauf aufbauende prototypische Implementierung erlaubte es, die aktuellen Positionen und Bestände der imSLTs über eine Webanwendung zu visualisieren. Innerhalb des Prototyps waren jedoch aufgrund von technischen Einschränkungen des IoT-Moduls die Anzeigen der Positionen und Bestände nicht immer aktuell und korrekt. Somit erfüllt die Implementierung die Anforderung A11 nicht vollumfänglich (vgl. Unterabschnitt 7.2.2).		
A12	Ein historischer Verlauf der Positionsdaten der modularen Sonderladungsträger muss ermittelt werden können (Tracing).	●	◐
	Für die Auswertung des historischen Verlaufs der Positionsdaten wurde der Service <i>digitales Behältermanagement</i> erstellt (vgl. Unterabschnitt 6.2.1). Dieser erhöht die Transparenz innerhalb des Behälterkreislaufs in Bezug auf Positions- und Bestandsverläufe sowie Standzeiten für die imSLTs, indem er die Daten des Service <i>aktuelle Positionen und Bestände</i> auswertet. Die für die Umsetzung benötigten Funktionsumfänge, Daten und Ressourcen sind durch das Architekturkonzept festgelegt (vgl. Abschnitt 6.4). Die prototypische Implementierung kann aufgrund der technischen Einschränkungen des IoT-Moduls und der damit verbundenen Ungenauigkeiten bei der Positionsbestimmung die gestellte Anforderung nicht vollumfänglich erfüllen (vgl. Unterabschnitt 7.2.2).		

Nr.	Anforderung Kurzbeschreibung der Anforderungserfüllung	Anforderungserfüllung	
		Konzept	Prototyp
A13	Eine automatisierte Buchung von Behälterbewegungen innerhalb des Behälterkreislaufs muss ermöglicht werden.	●	◐
	Der konzipierte Service <i>automatisierte Buchung</i> fokussiert die automatische Durchführung von Behälterbewegungsbuchungen (vgl. Unterabschnitt 6.2.1). Die hierfür benötigten Daten und deren Beziehungen untereinander sind durch das konzeptionelle Datenmodell definiert (vgl. Abschnitt 6.3). Ebenso sind die für die Realisierung des Service benötigten Ressourcen in die Fünf-Schichten-IoT-Architektur eingegliedert und wurden in Teilumfängen prototypisch implementiert (vgl. Abschnitt 6.4 und Unterabschnitt 7.2.2). Die Implementierung des Service <i>automatisierte Buchung</i> konnte den Buchungsvorgang aufgrund fehlender Schnittstellen nur anhand einer E-Mail-Benachrichtigung simulieren, weshalb der Prototyp die Anforderungen nicht vollumfänglich erfüllt (vgl. Unterabschnitt 7.2.2).		
A14	Eine Überwachung der Zustände (Füllstand, Temperatur, Erschütterung, Neigung und Luftfeuchtigkeit) soll für den modularen Sonderladungsträger realisiert werden.	●	◐
	Um die Zustände rund um den imSLT überwachen zu können, wurden entsprechende Funktionen entworfen und innerhalb des Service <i>Zustandsüberwachung</i> zusammengefasst (vgl. Unterabschnitt 6.2.1). Alle benötigten Daten und Ressourcen zur Realisierung des Service sind neben den Kommunikationsabläufen in den Schichten der konzipierten Architektur enthalten. Für die prototypische Implementierung wurde die Überwachung der Umgebungstemperatur und der Transporterschütterungen des imSLT erfolgreich umgesetzt und getestet (vgl. Unterabschnitt 7.2.2). Durch das entwickelte Dashboard konnte sich der Anwender die aktuellen Zustandsgrößen des imSLT visualisieren lassen. So werden wesentliche Aspekte der Anforderung A14 durch den Prototyp erfüllt. Aufgrund der technischen Einschränkungen des IoT-Moduls konnten weder der Füllstand, noch die Luftfeuchtigkeit überwacht werden.		
A15	Alle Daten entlang des Lebenszyklus eines modularen Sonderladungsträgers oder eines Moduls müssen (für spätere Auswertungen) erfasst und gespeichert werden.	●	●
	Der Service <i>Lebenszyklusüberwachung</i> wurde konzipiert, um dem Anwender alle innerhalb des Service-Systems gesammelten Daten bereitzustellen und diese bei Bedarf für ihn aufzubereiten (vgl. Unterabschnitt 6.2.1). Sowohl das Konzept als auch der Prototyp mit den integrierten Datenbanken und Exportfunktionen erfüllen die Anforderung vollumfänglich (vgl. Unterabschnitt 7.2.2). Allerdings wäre die Umsetzung einer umfangreicheren und prozessnahen Auswertung der Daten (z. B. die CO ₂ -Bilanz des imSLT) wünschenswert.		

Nr.	Anforderung Kurzbeschreibung der Anforderungserfüllung	Anforderungserfüllung	
		Konzept	Prototyp
A16	Ein automatischer Soll-Ist-Vergleich von Daten, die für das Behältermanagement relevant sind (u. a. Bestände, Standzeiten), und die Überwachung von Grenzwerten müssen möglich sein (inkl. einer aktiven Benachrichtigung des Anwenders bei Abweichungen).	●	◐
	Funktionen zum automatischen Abgleich von Soll-Ist-Daten und der Überwachung von Grenzwerten sind für die Services <i>Wartung, Reinigung, digitales Behältermanagement, automatisierte Buchung</i> und <i>Zustandsüberwachung</i> direkt innerhalb des Servicekonzepts mit integriert (vgl. Unterabschnitt 6.2.1). Ebenso werden die Benachrichtigungsfunktionalitäten und benötigten Daten, bspw. die Datenklasse <i>Grenzwert</i> , für diesen Teil des Serviceumfangs im Aufbau der Architektur berücksichtigt (vgl. Abschnitt 6.4). Für den Prototyp wurde die Grenzwertüberwachung innerhalb der Services <i>digitales Behältermanagement</i> und <i>Zustandsüberwachung</i> umgesetzt und es wurden die Benachrichtigungsfunktionalitäten erfolgreich getestet (vgl. Unterabschnitt 7.2.2). Da nur die Grenzwertüberwachung und kein direkter Soll-Ist-Abgleich umgesetzt werden konnte, erfüllt der Prototyp nicht vollumfänglich die gestellte Anforderung.		
A17	Die Module und der modulare Sonderladungsträger selbst müssen eindeutig identifizierbar sein.	●	●
	Innerhalb des Architekturkonzepts wurde die Kennzeichnung jedes Moduls und imSLT mit einer eindeutigen ID vorgesehen (vgl. Unterabschnitt 6.4.1). Basierend auf dieser werden bspw. Montage- oder Reparaturvorgänge dokumentiert und die Lager- und Einsatzhistorie je Modul aufgezeichnet. Als technische Umsetzung in der prototypischen Implementierung kam der QR-Code zum Einsatz (vgl. Unterabschnitt 7.2.2).		
A18	Datenpakete müssen von der IoT-Technologie am Ladungsträger bis zum Anwender sowohl intervall- als auch ereignisbasiert übertragen werden können.	●	●
	Die intervall- und ereignisbasierte Datenübertragung von der Shopfloor-Ebene bis hin zur Visualisierung für den Anwender werden durch den schichtweisen Aufbau und die integrierten Kommunikationsabläufe der Fünf-Schichten-IoT-Architektur realisiert (vgl. Abschnitt 6.4). Mithilfe der Versuche mit der implementierten Architektur konnte so die durchgängige Datenübertragung sowohl intervall- als auch ereignisbasiert nachgewiesen werden (vgl. Unterabschnitt 7.2.1).		

Nr.	Anforderung Kurzbeschreibung der Anforderungserfüllung	Anforderungserfüllung	
		Konzept	Prototyp
A19	Es muss die Möglichkeit bestehen sowohl Echtzeitdaten als auch historische Daten verarbeiten zu können.	●	●
	Basierend auf dem erstellten konzeptionellen Datenmodell und dessen Eingliederung in Form einer Datenbank in die Fünf-Schichten-IoT-Architektur können sowohl historische als auch Echtzeitdaten verarbeitet werden (vgl. Abschnitt 6.3 und Unterabschnitt 6.4.3). Dies wurde durch die Umsetzung des Prototyps und der damit verbundenen funktionsfähigen Datenverarbeitung von aktuellen Daten des IoT-Moduls (aktuelle Position) als auch von historischen Datensätzen (Positionsverlauf) bestätigt (vgl. Unterabschnitt 7.2.1).		
A20	Funktionalitäten zur Speicherung, Verarbeitung und Auswertung von gesammelten Daten rund um den Behälter müssen vorhanden sein.	●	●
	Anforderung A20 ist vollumfänglich erfüllt, da sowohl innerhalb der Fünf-Schichten-IoT-Architektur als auch bei deren prototypischen Umsetzung Ressourcen zur Speicherung, Verarbeitung und Auswertung von Daten vorgesehen wurden (vgl. Unterabschnitt 6.4.3 und Unterabschnitt 7.2.1). Diese Ressourcen werden benötigt, um die gesammelten Daten entsprechend der konzipierten Serviceumfänge (vgl. Unterabschnitt 6.2.1) aufbereiten und speichern zu können. Für die Gestaltung der Datenverarbeitung wurde u. a. der SOA-Ansatz berücksichtigt.		
A21	Eine plattformunabhängige Visualisierung und Exportfunktion der generierten Daten und Auswertungen müssen gewährleistet sein.	●	●
	Das Architekturkonzept ermöglicht auf Basis einer Kombination von Web- und Applikationsserver innerhalb der <i>Cloud & Applikationsschicht</i> eine plattformunabhängige Visualisierung und Exportfunktion (vgl. Unterabschnitt 6.4.3). Darauf aufbauend wurde für die prototypische Umsetzung eine Cloud-Plattform ausgewählt, welche es dem Anwender ermöglichte von jedem beliebigen Endgerät über einen Webbrowser auf die umgesetzten Serviceumfänge zuzugreifen. Dabei konnte der Anwender die ausgewerteten Daten sowohl visualisieren als auch exportieren (vgl. Unterabschnitt 7.2.1). Demensprechend ist die Anforderung durch das Konzept und den Prototyp vollumfänglich erfüllt.		
A22	Es müssen Schnittstellen zur Kommunikation mit anderen Anwendungen (u. a. ERP-Systeme) berücksichtigt werden.	●	—
	Auf einer übergeordneten Betrachtungsebene werden innerhalb der Servicegestaltung und der Fünf-Schichten-IoT-Architektur benötigte Schnittstellen zu externen Systemen berücksichtigt (vgl. Unterabschnitt 6.2.1 und Unterabschnitt 6.4.3). Für die spätere Realisierung der Schnittstellen ist ein Anwendungsserver in die <i>Cloud & Applikationsschicht</i> vorgesehen. Die Schnittstellen werden allerdings aufgrund ihrer Abhängigkeit von der konkreten Softwareanwendung nicht genauer spezifiziert.		

Nr.	Anforderung Kurzbeschreibung der Anforderungserfüllung	Anforderungserfüllung	
		Konzept	Prototyp
A23	Standards und Normen sollen verwendet werden, um den unternehmensübergreifenden Einsatz des Service-Systems zu vereinfachen.	●	◐
	Innerhalb des Konzepts werden sowohl für die Datenerfassung und -verarbeitung als auch für die Datenübertragung gängige Standards (bspw. EPCIS) berücksichtigt, um einen unternehmensübergreifenden Einsatz des Service-Systems zu gewährleisten (vgl. Abschnitt 6.4). Für die prototypische Umsetzung konnten diese allerdings, technisch bedingt, nur in begrenztem Maße umgesetzt werden, weshalb der Prototyp die Anforderung nicht vollumfänglich erfüllt (vgl. Unterabschnitt 7.2.1).		
A24	Eine Veränderung der Anzahl von Teilnehmern (modulare Sonderladungsträger, sonstige Datenquellen und Anwender) im Service-System müssen jederzeit möglich sein (Skalierbarkeit).	●	—
	Die Skalierung des Service-Systems um weitere Anwender, Ladungsträger oder Datenquellen ist innerhalb des konzeptionellen Datenmodells vorgesehen (vgl. Abschnitt 6.3). Auch ist die <i>Anwenderschicht</i> der Fünf-Schichten-IoT-Architektur, durch die Aufteilung in Akteur und Rolle, auf eine schnelle Skalierbarkeit der Anwenderanzahl ausgelegt (vgl. Unterabschnitt 6.4.5). Die Erprobung der implementierten Architektur auf Skalierbarkeit, bspw. die Erhöhung der Anzahl der eingesetzten imSLTs, konnte, wie bereits in Unterabschnitt 7.2.2 erläutert, nicht durchgeführt werden.		
A25	Eine Erweiterung um zusätzliche Funktionalitäten und Datenquellen, bspw. um andere Ladungsträgertypen, muss gewährleistet sein (Erweiterbarkeit).	●	—
	Die Erweiterbarkeit der Architektur um neue Funktionen ist durch die modulare Gestaltung der Funktions- bzw. Serviceumfänge möglich (vgl. Unterabschnitt 6.2.1). So können, basierend auf vorhandenen Umfängen, mit wenig Mehraufwand neue Funktionalitäten erstellt und über die Kategorisierung der Teilfunktionen in die einzelnen Schichten der Architektur integriert werden (vgl. Abschnitt 6.4). Auch die Erweiterung um weitere Datenquellen ist analog zur Skalierbarkeit im konzeptionellen Datenmodell berücksichtigt (vgl. Abschnitt 6.3). Eine Erweiterung der prototypischen Implementierung fand nicht statt, da diese durch die Experten als nicht zielführend eingeschätzt wurde (vgl. Unterabschnitt 7.2.2).		

Nr.	Anforderung Kurzbeschreibung der Anforderungserfüllung	Anforderungserfüllung	
		Konzept	Prototyp
A26	Ein Berechtigungskonzept muss den Datenzugriff regulieren. Für die Regulierung des Datenzugriffs wurde ein Berechtigungskonzept erstellt, welches die Vorteile eines rollen- und attributbasierten Verfahrens vereint. Das Berechtigungskonzept regelt den Datenzugriff innerhalb des Service-Systems basierend auf vordefinierten Rollen und dynamischen Situationsregeln (vgl. Abschnitt 6.5). Auf die detaillierte Ausgestaltung aller für das Service-System benötigten Situationsregeln wurde im Rahmen dieser Arbeit verzichtet. Der Umfang der benötigten Regeln wäre zu groß gewesen und die Situationsregeln hätten nur für einen spezifischen Behälterkreislauf angewendet werden können. Dementsprechend wurde für die prototypische Implementierung eine rein rollenbasierte Zugriffsregelung implementiert.	●	—
A27	Ein durchgängiges Sicherheitskonzept (Safety und Security) muss integriert werden. Für das Konzept und die Implementierung der Fünf-Schichten-IoT-Architektur wurden gängige Verschlüsselungsverfahren (u. a. AES128), Sicherheitsprotokolle (u. a. TLS) und Redundanzen im Hardwareaufbau berücksichtigt (vgl. Abschnitt 6.4 und Unterabschnitt 7.2.1). So erfüllen sowohl das Konzept als auch der Prototyp die Anforderung vollumfänglich. Empfehlenswert für die anwendungsfallspezifische Realisierung des Konzepts ist hier, Leitfäden und Checklisten bzgl. der IT-Sicherheit (vgl. u. a. [Bun-2016; Tru-2018b; BIT-2013]) mit den unternehmensspezifischen Gegebenheiten abzugleichen.	●	●

Zusammenfassend lässt sich für die Evaluierung der Anforderungserfüllung festhalten, dass die konzipierte Architektur für das unternehmensübergreifende Service-System mit imSLTs alle formulierten Anforderungen vollumfänglich erfüllt. Weiter konnten 15 Anforderungen mithilfe der prototypischen Implementierung bzgl. ihrer Anforderungserfüllung evaluiert werden. Dabei erfüllt der implementierte Prototyp der Fünf-Schichten-IoT-Architektur sechs Anforderungen in den wesentlichen Aspekten und neuen Anforderungen vollumfänglich.

7.4 Nutzenbewertung

In diesem Abschnitt wird untersucht, ob das erstellte Architekturkonzept zur Verbesserung der aktuellen Situation im Behältermanagement beiträgt. Dabei wird explizit auf die Nutzenkategorien aus Unterabschnitt 6.2.2 eingegangen. Als Evaluierungsmethode dient eine Umfrage, da anhand dieser die Nutzenkategorien gezielt aus Anwendersicht bewertet werden können. Im Folgenden werden das Design, der Aufbau und die Auswertung der Umfrage präsentiert. Die Auswertung der Umfrageergebnisse

wurde durch eine Studienarbeit (vgl. [fml-2020]) unterstützt. Teilumfänge der nachfolgenden zwei Unterabschnitte wurden bereits in [Zei-2020a] veröffentlicht.

7.4.1 Design und Aufbau der Umfrage

In Abbildung 7-14 sind das grundlegende Design und der Aufbau der Umfrage für die qualitative Nutzenevaluation der konzipierten und in Teilumfängen implementierten Architektur dargestellt. Bei der Umfrage handelt es sich um ein internetbasiertes Experteninterview in Form eines Fragebogens. Um die geforderten Fragen vollständig beantworten zu können, müssen die Experten mit dem Aufbau und den Umfängen des Service-Systems vertraut sein oder den Prototyp bereits verwendet haben. Dementsprechend kommt nur ein begrenzter Personenkreis für die Umfrage in Betracht. Dieser besteht aus 12 Personen, wobei die meisten davon Experten aus der Automobilbranche sind. Zum Zeitpunkt der Befragung beschäftigen sich 11 der 12 befragten Personen täglich oder sehr häufig mit dem Service-System und der damit verbundenen Architektur.

Ziel der Befragung ist es, den potenziellen Nutzen des erstellten Service-Systems anhand der Erfahrungen, Einschätzungen und Meinungen der Expertengruppe zu evaluieren. So soll bewertet werden, ob die Fünf-Schichten-IoT-Architektur die Potenziale von imSLTs erschließt und durch die Bereitstellung der Services einen Nutzen für das Behältermanagement generiert. Die Teilnehmer bewerten sowohl die Servicekonzepte als auch das prototypisch implementierte Service-System.

Als empirische Forschungsmethode wird der Mixed-Methods Ansatz (vgl. [Kuc-2014]) mit einer Kombination aus qualitativer und quantitativer Umfrage ausgewählt. Dabei wird die Umfrage im sogenannten parallelen Design (gleichzeitige Erhebung von qualitativen und quantitativen Daten, vgl. [Kuc-2014, S. 71ff.]) durchgeführt, wobei der qualitative Teil höher priorisiert ist. Die höhere Priorisierung der qualitativen Umfrage begründet sich darin, dass trotz des kleinen Teilnehmerkreises eine möglichst hohe Aussagekraft und ein hoher Informationsgehalt der Antworten erzielt werden soll. Auch wenn aufgrund des kleinen befragten Personenkreises die Ergebnisse nicht statistisch ausgewertet werden können, ist es durch die Erhebung quantitativer Daten möglich, die Umfrageergebnisse anschaulicher darzustellen und zu diskutieren (vgl. [fml-2020, S. 53f.]).

Die Umfrage enthält offene, halb-offene und geschlossene Fragen, wobei bei den letzten zwei Fragearten sowohl topologische Skalen (nicht metrisch) als auch Kardinalskalen (metrisch) zum Einsatz kommen. Das Ziel der Umfrage wird den Experten vor der Datenerhebung klar kommuniziert.

Der Fragebogen ist in vier Teile aufgliedert. Der erste Teil, mit einleitenden Fragen zur Person und zur persönlichen Einstellung gegenüber der Digitalisierung, dient der Typisierung der Teilnehmer und hilft bei der weiteren Auswertung der Antworten. Im zweiten Teil werden Fragen zum konventionellen Sonderladungsträger gestellt mit dem Ziel, eine allgemeine Einschätzung zur Leistungsfähigkeit des bisherigen Systems zu erhalten. Der dritte Teil befasst sich mit dem imSLT, der Architektur und dem darauf aufbauenden Service-System. Dieser Fragenblock zielt drauf ab, die in Unterabschnitt 6.2.2 identifizierten Nutzenkategorien und die möglichen Zukunftsszenarien zu evaluieren. Abschließend wird die System Usability Scale (SUS), ein etablierter Fragebogen zur Feststellung der Gebrauchstauglichkeit eines Systems (vgl. [Jor-1996, S. 189ff.]), eingesetzt, um den bereits implementierten Prototyp zu bewerten. Die genauen Fragestellungen und Antwortmöglichkeiten der Umfrage sind in Anhang A.2 aufgelistet.

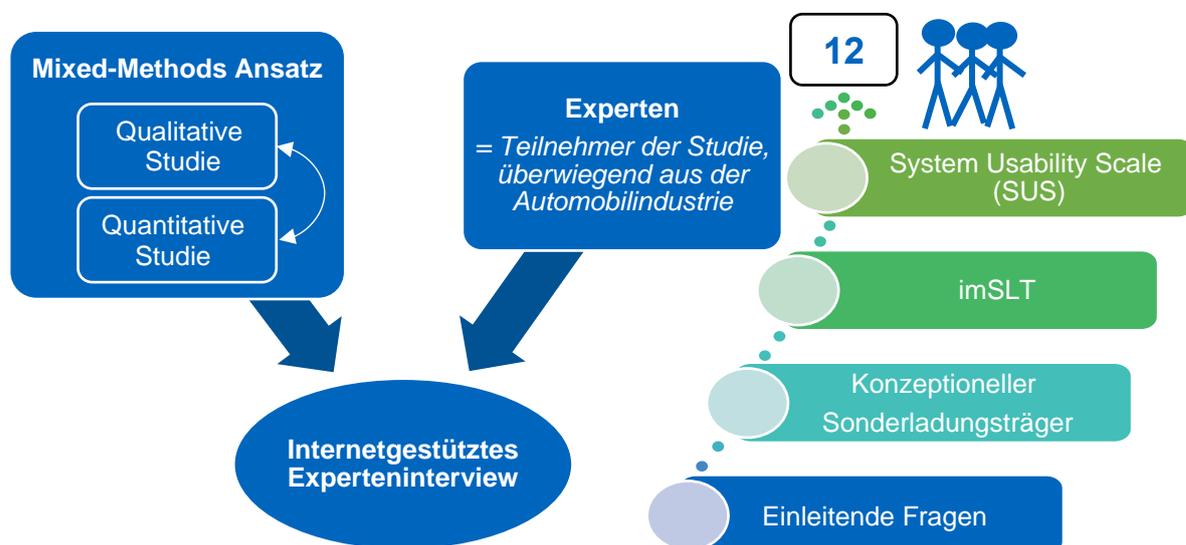


Abbildung 7-14: Design und Aufbau der durchgeführten Umfrage [Zei-2020a]

7.4.2 Auswertung der Umfrageergebnisse

In den folgenden Absätzen wird die Auswertung der Umfrage, abweichend vom Aufbau des Fragebogens, gegliedert nach den Nutzenkategorien (siehe Unterabschnitt 6.2.2) dargestellt. Da nicht immer alle Experten jede Frage beantwortet haben, werden die Ergebnisse der Umfrage in Prozent dargestellt, wobei die Gesamtanzahl der eingegangenen Antworten pro Frage (in der weiteren Beschreibung mit n angegeben) zwischen 10 und 12 variiert.

Prozessauswirkung

Die Ergebnisse der Befragung zeigen, dass die durch die konzipierten Serviceumfänge erzielte *Verbesserung der Transparenz* von Logistikprozessen einen großen Nutzen für die Praxis bietet und nach Ansicht der Experten die Grundlage für viele weitere Optimierungsmöglichkeiten bildet. In diesem Zusammenhang bewerteten die Experten u. a. das Ausmaß des Nutzens einer Erfassung von Temperatur, Erschütterungsgrad und Standort. 82 % der Befragten ($n = 11$) sehen einen großen bis sehr großen Nutzen darin den Standort der imSLTs kontinuierlich zu erfassen und jederzeit einsehen zu können (siehe Abbildung 7-15). Laut den Teilnehmern steht dabei besonders die Transparenzsteigerung innerhalb der Lieferkette im Vordergrund. Werden bspw. die aktuellen Bestände an Ladungsträgern korrekt dargestellt, erhöht das nach Aussage der Experten die Planungssicherheit deutlich. Bzgl. der Überwachung von Erschütterungen geben 80 % der Experten ($n = 10$) den Nutzen für ihre tägliche Arbeit als groß oder sehr groß an. Hier wurde mehrfach erwähnt, dass durch den Einsatz einer Erschütterungsüberwachung beschädigte Behälter oder Transportgüter leichter bemerkt und ggf. durch eine Nachbestellung ersetzt werden können. Für die kontinuierliche Erfassung der Umgebungstemperatur sehen nur 20 % der Experten ($n = 10$) einen vergleichbar großen Nutzen für die Praxis (siehe Abbildung 7-15). Die Auswertung der Kommentare zeigt, dass die meisten Teilnehmer von einer Erfassung und Darstellung des Temperaturverlaufs nicht vollständig überzeugt sind, da in der Automobilindustrie nur wenige temperaturempfindliche Produkte transportiert werden.

- Wie groß schätzen Sie den Nutzen ein zu wissen, in welchem Teil des Werks (z. B. Wareneingang, Montage) sich der imSLT gerade befindet? ($n = 11$)
- Wie groß schätzen Sie den Nutzen ein zu wissen, welche Umgebungstemperatur am imSLT herrscht? ($n = 10$)
- Wie groß schätzen Sie den Nutzen ein, die Erschütterungen des imSLT überwachen zu können? ($n = 10$)

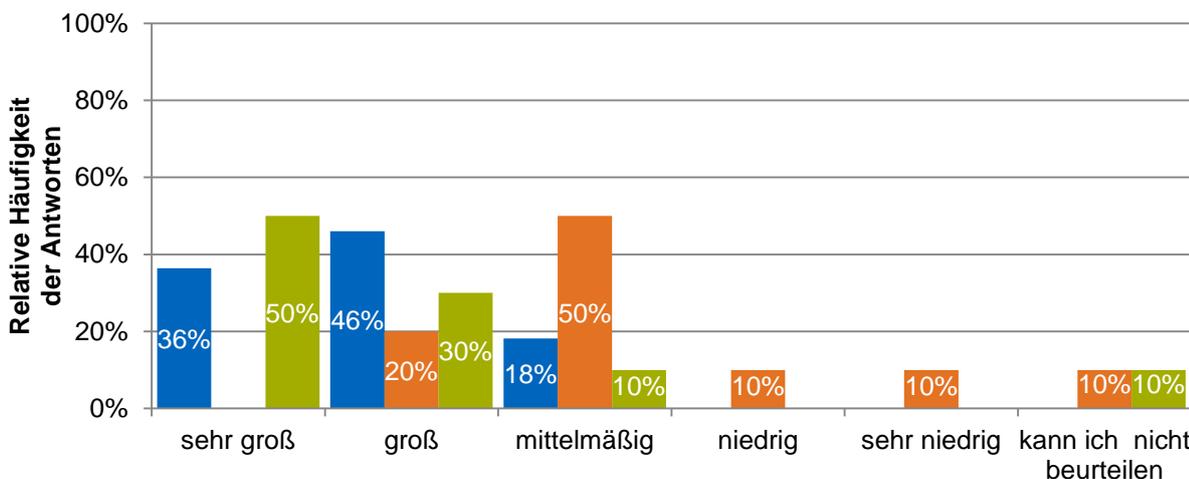


Abbildung 7-15: Umfrageergebnisse zur Nutzenkategorie Verbesserung der Transparenz [in Anlehnung an fml-2020, S. 71]

In Zusammenhang mit der Nutzenkategorie *Erhöhung der Automatisierung und Standardisierung* halten 80 % der Experten ($n = 10$) die Ablösung der manuellen Inventur durch eine automatisierte Bestandsführung auf Basis der Standortverfolgung von imSLTs für sehr wahrscheinlich. Dieses System kann nach Meinung der Teilnehmer auch fehlerreduzierende Effekte im betrieblichen Ablauf erzielen und die manuellen Buchungsvorgänge (z. B. die Wareneingangsbuchung) gänzlich ersetzen. Außerdem kann sich die Mehrheit der Teilnehmer den Einsatz eines Service zur Überwachung der Zustände (Zustimmung bei 80 % der Experten, $n = 10$) und Standorte (Zustimmung bei 90 % der Experten, $n = 10$) der imSLTs als eine Art Assistenzsystem bei ihrer täglichen Arbeit gut vorstellen. Ziel des Assistenzsystems ist dabei eine Fehlerreduktion im operativen Prozess. So würden die Befragten dieses Assistenzsystem für den Behälterkreislauf zur Reduzierung des manuellen Aufwands, bspw. bei der Bestandsermittlung oder der Ursachenforschung bei Beschädigungen, einsetzen und damit zur Senkung der Fehlerquote beitragen. Außerdem sind laut 70 % der Experten ($n = 10$), dank der Modularität des physischen imSLT, weniger Konstruktionsmängel und ein standardisierter Produktionsprozess für den zukünftigen imSLT-Pool zu erwarten. Ergänzend wurde erwähnt, dass aufgrund der standardisierten Module bereits mehrere Optimierungsschleifen bzgl. der Konstruktion berücksichtigt wurden. Auf lange Sicht können durch die gesammelten Erfahrungswerte zukünftige Fehler vermieden werden. Aus den Umfrageergebnissen kann abgeleitet werden, dass die Experten eine *Erhöhung der Automatisierung und Standardisierung* innerhalb der Prozesse des Behältermanagements durch das Service-System als wünschenswert und realisierbar ansehen.

Zur Überwachung des Behälterkreislaufs und damit zur *Sicherstellung der Einhaltung von Lieferzeiten und Produktqualität* bietet die implementierte Architektur dem Anwender eine automatische Überprüfung von Grenzwerten an. Diese Funktion benachrichtigt den Nutzer bei einer Grenzwertüberschreitung. Die meisten Umfrageteilnehmer ($n = 11$) halten eine automatische Benachrichtigung bei Grenzwertverletzungen von Standzeiten (82 %), Erschütterungen (82 %) und Umgebungstemperaturen (73 %) für sinnvoll (siehe Abbildung 7-16). Die Experten nannten vor allem den Batterietransport hinsichtlich der Brandgefahr bei Batteriezellen als Beispiel für die zukünftige Bedeutung der Temperaturüberwachung. Die Auswertung der Umfrage zeigt, dass nach Einschätzung der Teilnehmer die Grenzwertüberwachung bzgl. der Temperatur Vorteile mit sich bringt, jedoch der Nutzen der Anzeige des reinen Temperaturverlaufs nicht allzu hoch zu bewerten ist. Die Experten fügten hinzu, dass eine Grenzwertüberprüfung insbesondere bei Erschütterungen von zerbrechlichen Transportgütern (z. B. Glasscheiben) sinnvoll ist, um Maßnahmen vor dem Verbau von beschädigten Produkten ergreifen zu können. Bzgl. der Überwachung von Standzeiten wurde ange-

merkt, dass die Benachrichtigung bei einer Grenzwertverletzung die Bestandsverwaltung erleichtern würde und so vergessene bzw. ungenutzte Behälter erkannt werden könnten.

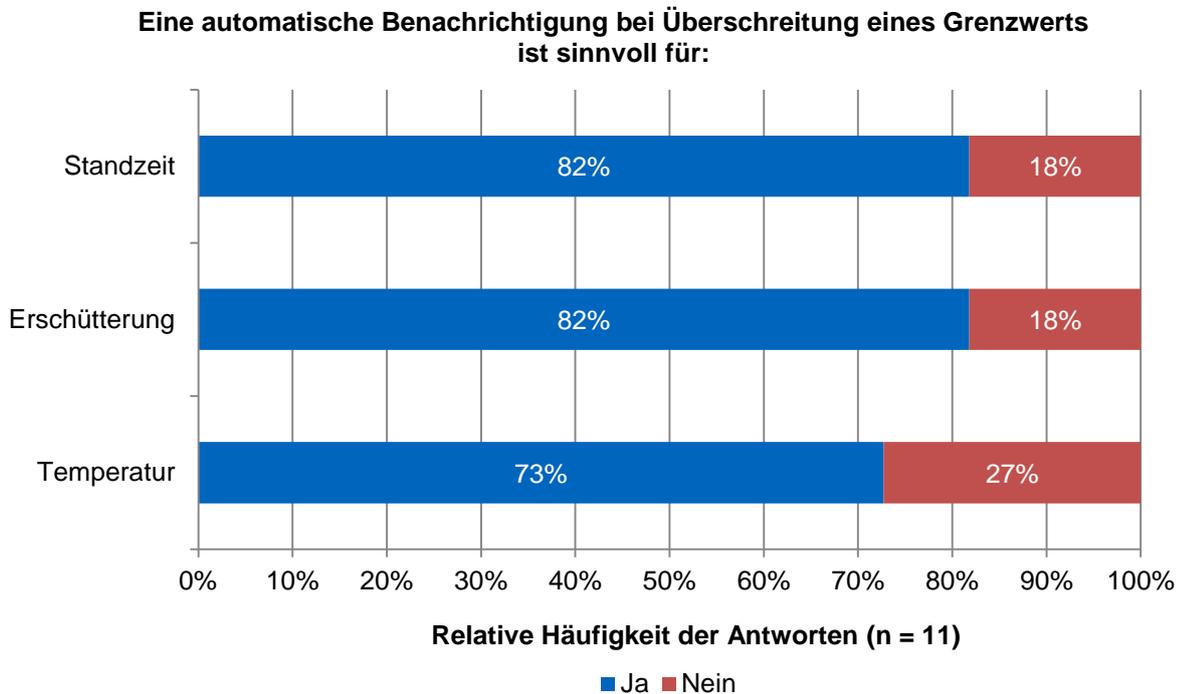


Abbildung 7-16: Umfrageergebnisse zur Grenzwertüberwachung von Standzeit, Erschütterung und Temperatur [Zei-2020a]

Die Teilnehmer wurden gefragt, welche Maßnahmen sie ergreifen würden, um die Lieferzeiten und die Produktqualität entlang der Lieferkette sicherzustellen, nachdem sie über eine Grenzwertverletzung benachrichtigt wurden. Hinsichtlich der Antwortmöglichkeiten tendieren die Experten vor allem zu Maßnahmen, die weniger stark in den Logistikprozess eingreifen. Dazu gehören z. B. das Warten auf die nachträgliche Ursachenanalyse oder die direkte Kontaktaufnahme mit dem Lieferanten, um weitere Informationen zur Grenzwertverletzung zu erhalten. Maßnahmen, die stärker in den laufenden Prozess eingreifen, wie etwa das Stoppen des Transports, um die Ware zu überprüfen oder die Sendung direkt nachzubestellen, finden nur zwei von zehn Experten sinnvoll. Die Teilnehmer merkten an, dass ihr Verhalten stark von der jeweiligen Situation und dem Transportgut abhängt. Alle Experten geben an, dass sie auf Basis der durch das Service-System bereitgestellten Informationen Maßnahmen zur Sicherstellung von Lieferzeiten und Produktqualität ergreifen würden, falls diese nötig wären. Zum Schutz des Produkts, würde die Mehrheit der Befragten bzgl. der Säuberung von imSLTs eine Kombination aus reaktiver und proaktiver Reinigung bevorzugen. Es wurde allerdings darauf hingewiesen, dass der Nutzen und die Wirtschaftlichkeit einer Reinigung stark von den zu transportierenden Produkten abhängen. 30% der Experten ($n = 10$) sind der Meinung, dass die Reinigung des imSLT keine merkliche Verbesse-

rung der Transportbedingungen bedeutet. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass alle Befragten die Bereitstellung diverser Nutzen der Nutzenkategorie *Sicherstellung der Einhaltung von Lieferzeiten und Produktqualität* durch das Service-System positiv bewerten.

Die Experten wurden weiter gefragt, ob sie durch die Standort- und Zustandsüberwachung eine zukünftige *Reduzierung von Schäden und Reparaturaufwand* erwarten. Die meisten sind sich einig, dass eine kurzfristige Schadensvermeidung mit den vorhandenen Daten nicht möglich ist. Jedoch sehen sechs der zehn Befragten eine langfristige Vermeidung von Schäden, basierend auf der nachträglichen Datenanalyse und der damit verbundenen Optimierung des Ladungsträgers oder durch die Veränderung von Handhabungsschritten, als sehr wahrscheinlich an. Ebenso wurde kommentiert, dass die Ursachenidentifikation von Beschädigungen bereits innerhalb der prototypischen Implementierung durch die Erfassung von Erschütterungen deutlich vereinfacht wird.

Darüber hinaus wurden die Teilnehmer befragt, ob der Reparaturaufwand durch einen digitalen Schadensbericht verringert werden kann. 50 % der Experten ($n = 10$) sind davon überzeugt, dass eine vorab durchgeführte Schadensaufnahme die anschließende Reparatur stark vereinfacht. Nur ein Befragter kann sich keine Reduzierung des Reparaturaufwands vorstellen. Auch wurde des Öfteren angemerkt, dass durch die vorab mögliche Abschätzung des Reparaturaufwands entschieden werden kann, ob Reparaturen direkt vor Ort durchgeführt werden. So entfällt der Transport zu einem externen Dienstleister, wodurch die Reparaturzeit verkürzt wird. Für die Nutzenkategorie *Reduzierung von Schäden und Reparaturaufwand* sehen die Experten somit diverse Nutzen, die mit dem Service-System erzielt werden können.

Kundenauswirkung

Der nächste Teil des Fragebogens richtete den Blick auf die Bewertung des Service-Systems in Bezug auf dessen *Steigerung der Kundenzufriedenheit*. Der erste Kundenkontakt mit dem Service-System ist die Bestellung des imSLT über den imSLT-Konfigurator. 73 % der Befragten ($n = 11$) bewerten eine Vereinfachung des Bestellprozesses durch die Nutzung des webbasierten Konfigurators als möglich. Sie betonten allerdings auch, dass Sonderwünsche noch nachträglich und persönlich besprochen werden müssten. So kann nach Meinung der Experten der imSLT-Konfigurator den Bestellprozess deutlich vereinfachen und Abstimmungsschleifen zwischen Kunde und Hersteller stark reduzieren, wodurch die Kundenzufriedenheit steigt. Jedoch lassen sich nach Aussage der Befragten diese Abstimmungsrunden nicht vollständig vermeiden.

Nach der Bestellung von imSLTs über den imSLT-Konfigurator kommt der Service *Auftragsverfolgung* zum Einsatz. Hier zeigen die Ergebnisse der Umfrage, dass eine transparentere Auftragsverfolgung von der Bestellung bis zur Auslieferung der imSLTs die Planungssicherheit und das Kundenvertrauen erhöhen und somit die Kundenzufriedenheit steigert (siehe Abbildung 7-17). Wenn der Auftragsstatus des Service *Auftragsverfolgung* zuverlässig und transparent ermittelt wird, gewinnt der Kunde nach Aussage der Umfrageteilnehmer an Informationsqualität und kann so seine Prozesse besser planen und terminieren. Allerdings erwähnten einige Befragte, dass im Falle einer temporär angezeigten Lieferverzögerung die Gefahr besteht, dass die Kundenzufriedenheit sinkt, auch wenn der geplante Liefertermin letztendlich eingehalten wird. Gleichzeitig sehen 73% der Experten ($n = 11$) hier auch einen Vorteil in der Transparenzsteigerung, wenn bspw. die Gründe der Lieferverzögerung nachvollziehbar sind. Schlussendlich stimmen alle Experten grundsätzlich überein, dass durch ein vollständig implementiertes Service-System die Kundenzufriedenheit verbessert wird.

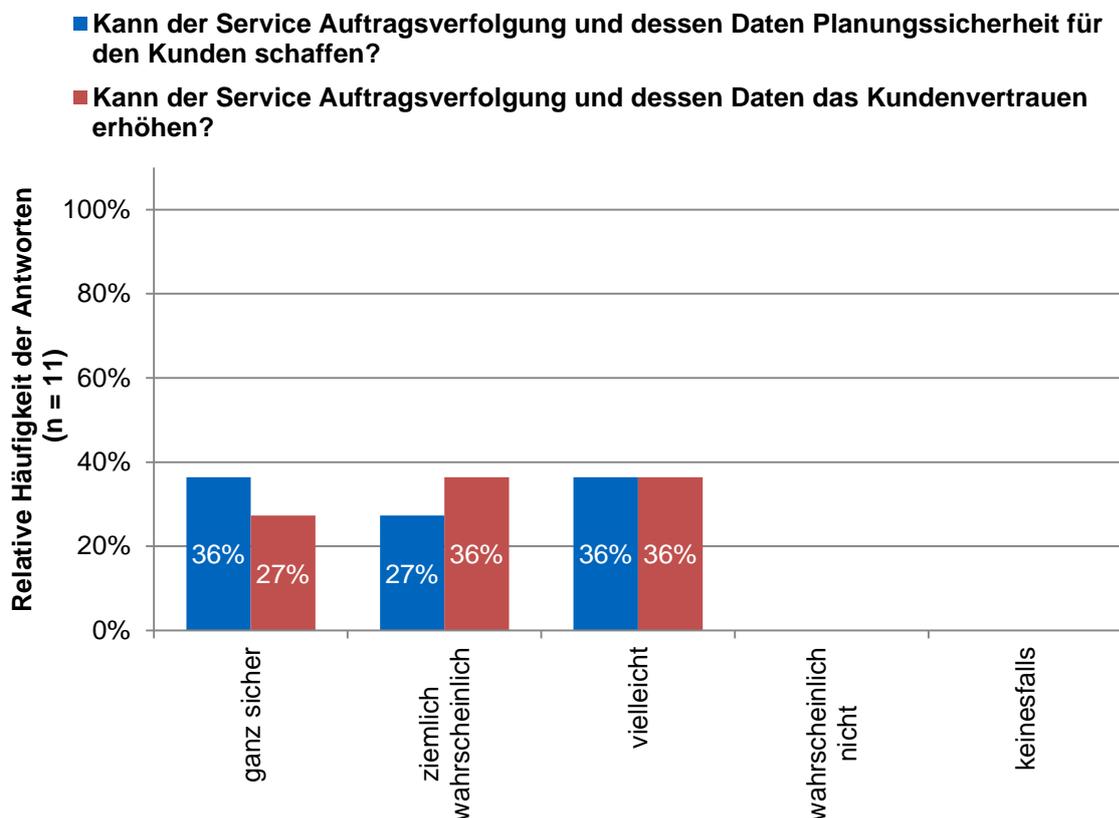


Abbildung 7-17: Erhöhung der Planungssicherheit und des Kundenvertrauens durch den Service Auftragsverfolgung [Zei-2020a]

Auch die Nutzenkategorie *Realisierung einer klaren Verantwortungsverteilung* kann nach Meinung aller Befragten durch das Service-System erfüllt werden. Dabei stimmen alle Experten zu, dass durch die Nutzung des Service-Systems eine klare Zuordnung von Verantwortlichkeiten, bspw. im Schadensfall oder bei Zwischenfällen, mög-

lich ist und so das verursachende Unternehmen bestimmt werden kann. Die Teilnehmer der Befragung schätzen dabei die Zustandsüberwachung und die Standortverfolgung der imSLTs als gleich wichtige Maßnahmen bei der Feststellung der Verantwortlichkeiten ein. Alle Befragten sind sich einig, dass sie das Service-System zur Ermittlung des verursachenden Unternehmens anwenden würden, da sie so die anfallenden Kosten für Schäden und Zwischenfälle klar den Unternehmen zuordnen könnten. Laut Aussage der Experten stehen für die Nutzung des Systems nicht nur finanzielle Gründe im Vordergrund, sondern auch die Ursachenforschung und die damit verbundene Optimierung der Prozesse. Die Frage, ob sich die Arbeitsweise im Schadensfall mit der Einführung des Service-Systems verändern würden, bejahten 50 % der Experten ($n = 10$), wobei sie anmerkten, dass eine Reduktion des Arbeitsaufwands aufgrund geringerer Abstimmungs- und Klärungsbedarfe zu erwarten sei.

Umweltauswirkung

Die *Verbesserung der ökologischen Nachhaltigkeit* ist ein weiteres wichtiges Ziel des Service-Systems. Dabei spielt vor allem die Einführung des CO₂-Berichts eine große Rolle. Dieser Bericht fasst die CO₂-Bilanz der wiederverwendbaren Module am Ende des Lebenszyklus zusammen. Die Mehrheit (80 %, $n = 10$) der Experten zeigt großes Interesse an der Bereitstellung eines solchen CO₂-Berichts. Die Befragten gaben an, dass sie damit öffentlich für ihren ökologischen Fußabdruck werben würden. Ausschlaggebend für ihr Interesse an diesem Bericht ist u. a., dass mit der ermittelten CO₂-Bilanz erstmals die Nachhaltigkeit eines Sonderladungsträgers quantitativ gemessen werden kann. So könnten nach Meinung der Experten Entscheidungen bzgl. der Behälterbeschaffung im Unternehmen ggf. auch durch den ökologischen Fußabdruck des Behälters beeinflusst werden.

Die Experten wurden zu ihrer Meinung befragt, inwieweit eine regelmäßige Wartung die Lebensdauer der imSLTs bzw. der Module verlängern kann und dadurch zur ökologischen Nachhaltigkeit beigetragen wird. Der Großteil (50 %, $n = 10$) der Befragten hält es für wahrscheinlich, dass die Lebensdauer des imSLT durch eine regelmäßige Wartung verlängert wird (siehe Abbildung 7-18). Allerdings wurde auch erwähnt, dass es noch nicht genügend Studien zu diesem Thema gibt. Zwei Teilnehmer sehen keine Vorteile in einer regelmäßigen Wartung und verwiesen darauf, dass eine Reparatur ausreichend für die Verlängerung der Lebensdauer des imSLT sei. Die Experten argumentierten, dass die Wiederverwendung von Modulen des imSLT für einen weiteren Ladungsträger direkt zur ökologischen Nachhaltigkeit beiträgt, der CO₂-Bericht selbst jedoch nicht. Öffentlichkeitsarbeit und die aktive Wahrnehmung des CO₂-Abdrucks der Behälter sind allerdings zwei Einsatzmöglichkeiten des CO₂-Berichts, um das Umweltbewusstsein sowohl intern als auch extern zu stärken. So trägt auch der Bericht indirekt zur *Verbesserung der ökologischen Nachhaltigkeit* bei.

**Denken Sie, dass die Lebensdauer des imSLT durch eine regelmäßige
Wartung verlängert wird?**

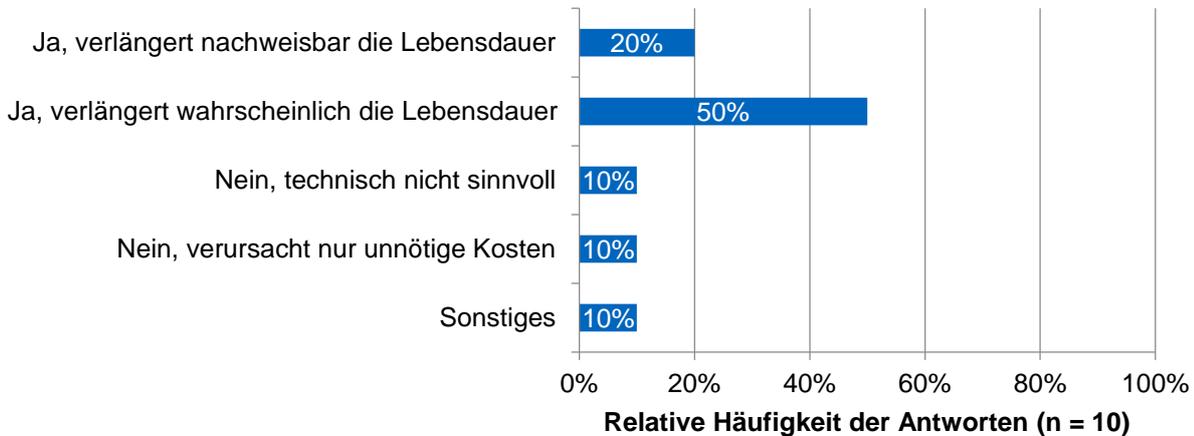


Abbildung 7-18: Umfrageergebnis zur Wartung des imSLT [in Anlehnung an fml-2020, S. 87]

Diesen Frageblock abschließend, beurteilten die Experten ($n = 10$) den konventionellen Sonderladungsträger und den imSLT (als Teil des Service-Systems) im direkten Vergleich mit Schulnoten. Dabei wurden die *Entwicklung und Herstellung*, der *physischer Behälter Einsatz* und das *Behältermanagement* jeweils separat für jeden Ladungsträger bewertet. Die größte Verbesserung zum konventionellen Sonderladungsträger sehen die Experten im *Behältermanagement*, welches beim imSLT mit einer Durchschnittsnote von 1,9 bewertet wurde. Dieses Ergebnis ist um fast zwei Notenstufen besser als die Benotung des Behältermanagements beim konventionellen Sonderladungsträger ($\bar{x} = 3,8$). Der Unterschied in der Benotung ist direkt auf das konzipierte Service-System zurückzuführen, welches nach Meinung der Experten deutliche Vorteile für das Behältermanagement mit sich bringt.

Den *physischen Behälter Einsatz* und die tägliche Handhabung des Behälters bewerten die Experten bei beiden Ladungsträgern als fast gleich gut. Hier gab es die Durchschnittsnoten 2,0 für den imSLT und 2,2 für den konventionellen Sonderladungsträger. Beide Ladungsträger konnten durch die Befragten, basierend auf ihren Erfahrungen beim prototypischen Einsatz im Feldszenario, direkt miteinander verglichen werden. Bei der Benotung wurde angegeben, dass der imSLT stabiler wirke und deshalb etwas besser als der konventionelle Ladungsträger sei. Für den dritten Bereich, die *Herstellung und Produktion* der Ladungsträger, erhielt der imSLT aufgrund der vielfältigen Optimierungsmöglichkeiten der Module die Durchschnittsnote 2,1. Er wurde um mehr als eine Notenstufe besser bewertet als der konventionelle Ladungsträger, der die Note 3,2 bekam. Somit verspricht nach Meinung der Experten der Einsatz von imSLTs in Kombination mit dem Service-System über alle drei Kategorien eine Verbesserung zur Ausgangssituation.

Zusammenfassend für die Nutzenbewertung kann festgehalten werden, dass die Experten alle sieben zuvor identifizierten Nutzenkategorien (siehe Unterabschnitt 6.2.2) als realisierbar einschätzen. Ihrer Meinung nach kommt es durch den imSLT in Verbindung mit den konzipierten Services zu einer Verbesserung in den Prozessen des Behältermanagements, zu einer Erhöhung der Kundenzufriedenheit und zu einer Steigerung der ökologischen Nachhaltigkeit. So erschließt die Fünf-Schichten-IoT-Architektur die Potenziale von imSLTs erfolgreich und ermöglicht nach Ansicht der Experten durch die Bereitstellung der Services einen großen Nutzen für zukünftige Einsatzszenarien.

7.5 Abschließendes Fazit und Beantwortung der Forschungsfragen

Die Ergebnisse der Evaluierung zeigten, dass es durch die konzipierte Fünf-Schichten-IoT-Architektur möglich ist, das erstellte Service-System mit imSLTs in eine aktive Supply Chain zu integrieren. So erlaubte der unternehmensübergreifend implementierte Prototyp der Architektur die Sammlung und Auswertung prozessrelevanter Daten. Dabei wurde die Datenübertragung vom imSLT auf der Shopfloor-Ebene über die servicespezifische Verarbeitung in der Cloud bis hin zur Visualisierung für den Anwender erfolgreich umgesetzt. Die daran anschließenden Versuchsreihen mit den prototypisch implementierten Serviceumfängen zeigten die Funktionsfähigkeit der Architektur sowie die noch bestehenden technisch bedingten Einschränkungen und die verbleibenden Verbesserungspotenziale auf. So konnte mit Abschluss der Evaluation der Umsetzbarkeit die Anwendbarkeit der Fünf-Schichten-IoT-Architektur unter Realbedingungen belegt und weitere Anhaltspunkte für die zukünftige Implementierung dargelegt werden.

Durch die Überprüfung der Anforderungserfüllung wurde bestätigt, dass die konzipierte Architektur den aufgestellten Anforderungen (siehe Abschnitt 5.3) vollumfänglich nachkommt und sie so die eingangs identifizierten Verbesserungspotenziale erreichen kann. In der daran anschließenden Nutzenbewertung wurde durch die befragten Experten attestiert, dass das unternehmensübergreifende Service-System mit imSLTs und somit die Fünf-Schichten-IoT-Architektur eine deutliche Verbesserung der aktuellen Situation innerhalb des Behältermanagements verspricht. Die Experten hielten alle sieben aufgestellten Nutzenkategorien (siehe Unterabschnitt 6.2.2) für sinnvoll. Dabei fanden sie auch viele Anhaltspunkte, dass durch die mithilfe der Architektur bereitgestellten Services zukünftig ein großer Nutzen innerhalb der Prozesse des Behältermanagements, eine Steigerung der Kundenzufriedenheit und eine Verbesserung der öko-

logischen Nachhaltigkeit erzielt werden können. Somit wurde die übergeordnete Zielsetzung dieser Arbeit, die *Konzeption einer Architektur für den unternehmensübergreifenden Behälterkreislauf, die die Potenziale von intelligenten, modularen Sonderladungsträgern erschließt und diese für Unternehmen nutzbar macht*, sowohl aus konzeptioneller Sicht erreicht (siehe Abschnitt 6.6) als auch die Zielerreichung, die Anwendbarkeit und der vielfältige Nutzen der Fünf-Schichten-IoT-Architektur durch die Evaluation bestätigt.

Die durch die vorliegende Forschungsarbeit erarbeiteten Antworten auf die eingangs formulierten Forschungsfragen werden im Folgenden, basierend auf den vorliegenden Kapiteln und beginnend mit den untergeordneten Teilfragen, zusammengefasst.

Welche datenbasierten und datenunterstützten physischen Services sind für das Behältermanagement eines unternehmensübergreifenden Behälterkreislaufs mit intelligenten, modularen Sonderladungsträgern sinnvoll?

Zur Beantwortung der ersten Teilfrage wurden aufbauend auf einer Ist-Prozess-Analyse des Behältermanagements (vgl. Abschnitt 5.2) und daraus abgeleiteten Anforderungen (vgl. Abschnitt 5.3) acht datenbasierte und sechs datenunterstützte physische Services für einen unternehmensübergreifenden Behälterkreislauf mit imSLTs erstellt: *imSLT-Konfigurator, Auftragsverfolgung (Herstellung), digitaler Schadensbericht, aktuelle Positionen und Bestände, digitales Behältermanagement, automatisierte Buchung, Zustandsüberwachung, Lebenszyklusüberwachung* sowie *Pooling-System* (für imSLTs), *Rekonfiguration, Recycling, Wartung, Reparatur und Reinigung* (vgl. Unterabschnitt 6.2.1). Die durch die konzipierten Serviceumfänge zu erzielenden Nutzen wurden in sieben Nutzenkategorien eingeteilt (vgl. Unterabschnitt 6.2.2) und durch eine Umfrage evaluiert. Dabei wurden die erwarteten Nutzen bestätigt (vgl. Abschnitt 7.4). Somit wurde die erste Forschungsfrage vollständig beantwortet.

Welche Funktionen, Daten und Kommunikationsabläufe müssen innerhalb der Architektur für den Einsatz dieser Services berücksichtigt werden?

Die innerhalb der Architektur zu berücksichtigenden Funktionen wurden basierend auf den identifizierten Anforderungen ermittelt und mithilfe eines hierarchischen Funktionsmodells dokumentiert (vgl. Unterabschnitt 6.2.1). Darüber hinaus sind die für den Einsatz der Services benötigten Daten sowie deren Struktur und Beziehungen in einem konzeptionellen Datenmodell zusammengefasst (vgl. Abschnitt 6.3). Die zu berücksichtigenden Kommunikationsabläufe, die nötig sind um ein funktionsfähiges Service-System zu gewährleisten, sind direkt in den Aufbau der Fünf-Schichten-IoT-Architektur mit eingearbeitet (vgl. Abschnitt 6.4). Die anschließende erfolgreiche prototy-

pische Implementierung von Teilumfängen zeigte, dass alle Komponenten für die Umsetzung und den Einsatz der Services berücksichtigt wurden (vgl. Abschnitt 7.2). Dementsprechend wurde auch die zweite Teilfrage beantwortet.

Wie müssen die Systemarchitektur und das Berechtigungskonzept für den unternehmensübergreifenden Einsatz des Service-Systems strukturiert werden?

Die innerhalb der Systemarchitektur benötigten Ressourcen wurden anhand des Funktions- und konzeptionellen Datenmodells erarbeitet. Die ermittelten Komponenten sind direkt im Aufbau der Fünf-Schichten-IoT-Architektur mit integriert und den einzelnen Schichten zugeordnet (vgl. Abschnitt 6.4). Durch die Implementierung des Prototyps konnte gezeigt werden, dass die Komponenten der entworfenen Systemarchitektur reibungslos zusammenarbeiten (vgl. Unterabschnitt 7.2.1). Das entworfene und auf der Fünf-Schichten-IoT-Architektur basierende Berechtigungskonzept regelt den Datenzugriff während der Nutzung des unternehmensübergreifenden Service-Systems. Dabei kommt eine Kombination aus Rollen und Situationsregeln zum Einsatz, die eine dynamische Datenzugriffsregulierung ermöglicht (vgl. Abschnitt 6.5). Das aufgestellte Berechtigungskonzept vervollständigt damit die Beantwortung der dritten Teilfrage.

Im Rahmen dieser Arbeit konnte auch die übergeordnete Forschungsfrage beantwortet werden.

Wie gestaltet sich eine Architektur, die die Erbringung von datenbasierten und daten-gestützten, physischen Services in einem unternehmensübergreifenden Service-System mit intelligenten, modularen Sonderladungsträgern ermöglicht?

Ausgehend von der Beantwortung der drei untergeordneten Forschungsfragen wurde eine Architektur erstellt, welche die identifizierten Funktionsumfänge, die benötigten Daten, die entworfenen Kommunikationsabläufe, die Ressourcen sowie das Berechtigungskonzept innerhalb eines fünfschichtigen Aufbaus vereint (vgl. Kapitel 6). So konnten die jeweiligen Ergebnisse der Teilfragen in die einzelnen Schichten der Fünf-Schichten-IoT-Architektur integriert und ein funktionsfähiges Gesamtsystem erstellt werden. Die aufgestellte Fünf-Schichten-IoT-Architektur ermöglicht die Erbringung von datenbasierten und datenunterstützten physischen Services in einem unternehmensübergreifenden Service-System mit imSLTs. Die abschließende Evaluierung der Architektur zeigte, dass sowohl die Umsetzbarkeit, die Anforderungserfüllung als auch der durch die Services zu erzielende Nutzen gegeben sind (vgl. Kapitel 7). Damit konnte auch die übergeordnete Forschungsfrage vollständig beantwortet werden.

Durch die Beantwortung aller eingangs gestellten Forschungsfragen konnte die in Abschnitt 4.1 identifizierte Forschungslücke erfolgreich geschlossen werden. Dabei sollten allerdings die folgenden Punkte beachtet werden. Nicht alle konzipierten Services

konnten implementiert und überprüft werden. Deshalb sollten vor dem weiterführenden Einsatz der Architektur weitere Teilumsetzungen in einem aktiven Behälterkreislauf erfolgen, um eine finale Bewertung aller konzipierten Serviceumfänge zu erhalten. Bedenkenswert ist auch, dass einige Services, die sich auf die Modularität des imSLT und die Wiederverwendung von Modulen stützen (z. B. Service *Rekonfiguration* oder Service *Recycling*), erst nach einem vollständigen Einsatzzyklus genutzt und vollumfänglich evaluiert werden können. Nicht weiter detailliert betrachtet wurden Auswertungsmöglichkeiten, die sich durch den Service *Lebenszyklusüberwachung* ergeben. Der Grund dafür ist die hieraus resultierende Vielzahl von unternehmensspezifischen Anwendungsmöglichkeiten der gesammelten Daten, deren detaillierte Auflistung für diese Arbeit nicht zielführend ist.

Für die Umsetzung einiger Services (z. B. Service *Pooling-System*, Service *Reparatur* oder Service *Wartung*) bedarf es der Einbindung und Schulung entsprechender Dienstleister und des Aufbaus eines imSLT-Pools. Beides wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht adressiert und sollte vor dem Einsatz der Architektur entsprechend tiefergehend untersucht werden. Diesbezüglich wurden bereits zwei Studienarbeiten, die sich mit der Auswahl des Lager- und Kommissioniersystems für die Komponenten- und Modullagerung der imSLTs beschäftigen, angefertigt (vgl. [fml-2018d] und [fml 2019c]). Trotzdem bleiben noch viele Fragestellungen bzgl. des Pooling-Betriebs (z. B. benötigte Lagerkapazitäten zur Realisierung der Services oder Standortentscheidungen für die Modullager) offen. Ebenso bedarf es für den produktiven Einsatz des Service-Systems einer detaillierten Ausarbeitung des Berechtigungskonzepts. Die hierfür benötigten Erweiterungen der Situationsregeln und Rollen sollten je nach Unternehmenskonstellation in enger Absprache mit den beteiligten Firmen durchgeführt werden. Abschließend ist zu erwähnen, dass innerhalb der vorliegenden Arbeit wirtschaftliche Aspekte bzgl. der Umsetzbarkeit nicht betrachtet wurden, da der Schwerpunkt auf der Konzeption und technischen Machbarkeitsanalyse der Architektur lag. Eine erste wirtschaftliche Machbarkeitsanalyse bzgl. des Einsatzes des Service-Systems wurde bereits durch *Naumann* durchgeführt (vgl. [Nau-2018; Gra-2020]).

8 Zusammenfassung und weiterer Forschungsbedarf

Getrieben durch die große Variantenvielfalt, den hohen Individualisierungsgrad und die kürzeren Produktlebenszyklen steigen der Aufwand der Koordination und die Komplexität des Materialflusses stetig. Um die damit einhergehenden Transportanforderungen zu gewährleisten, wird auch eine Vielzahl von Sonderladungsträgern eingesetzt. Dabei führt die steigende Bauteilvielfalt und -komplexität zu einer großen Anzahl von unterschiedlichen Sonderladungsträgertypen. Neben der Beherrschung der Variantenvielfalt der Ladungsträgertypen muss sich das Behältermanagement von Sonderladungsträgern auch zahlreichen Herausforderungen beim Einsatz der Behälter stellen. So kommt es durch die geringe Transparenz innerhalb des Behälterkreislaufs zu Problemen wie etwa Behälterengpässen, Unter-, Überbeständen oder Behälterschwund. U. a. lässt sich die fehlende Transparenz darauf zurückführen, dass die Behälterbewegungen innerhalb der Supply Chain kaum erfasst werden und die zugehörigen Datensätze bei den beteiligten Unternehmen redundant oder inkonsistent vorliegen.

Hier setzt die vorliegende Arbeit an. Um den beschriebenen Herausforderungen des Behältermanagements von Sonderladungsträgern zu begegnen, wurde eine Architektur für ein unternehmensübergreifendes Service-System mit intelligenten, modularen Sonderladungsträgern erarbeitet. Dabei wurde die digitale Transformation von Sonderladungsträgern zu cyber-physischen Systemen mit der Modularität des physischen Ladungsträgers verbunden, um datenbasierte und datenunterstützte physische Services anbieten zu können. In der Literatur gibt es bereits einige Forschungsarbeiten, die spezielle Teilaspekte der digitalen Transformation von Ladungsträgern und der Modularität bei Sonderladungsträgern adressieren. Jedoch fehlte ein ganzheitliches Konzept, welches die technische Dimension eines intelligenten, modularen Sonderladungsträgers mit einem unternehmensübergreifenden, datengetriebenen Service-System verbindet. Diese Forschungslücke galt es zu schließen. Durch diese Arbeit liegt nun eine Fünf-Schichten-IoT-Architektur vor, die den Einsatz von unternehmensübergreifenden Services von der Entwicklung über den Behältereinsatz bis zum Ende des Lebenszyklus der einzelnen Module des Ladungsträgers ermöglicht, um so das Behältermanagement zu unterstützen.

Die Anforderungen, die an eine solche Architektur von Seiten des Behältermanagements gestellt werden, sind innerhalb dieser Arbeit dokumentiert. Bei der Anforderungsermittlung erwies sich die Analyse der aktuellen Ist-Prozesse eines Fallbeispiels

aus der Automobilindustrie als hilfreich. Die auf den Anforderungen basierenden, konzipierten Services für einen unternehmensübergreifenden Behälterkreislauf mit intelligenten, modularen Sonderladungsträgern teilen sich in acht datenbasierte und sechs datenunterstützte physische Services auf. Die Services *imSLT-Konfigurator*, *Auftragsverfolgung* (Herstellung), *digitaler Schadensbericht*, *aktuelle Positionen und Bestände*, *digitales Behältermanagement*, *automatisierte Buchung*, *Zustandsüberwachung*, *Lebenszyklusüberwachung* sowie *Pooling-System*, *Rekonfiguration*, *Recycling*, *Wartung*, *Reparatur* und *Reinigung* liegen dabei jeweils als Funktionsmodell vor. Darüber hinaus wurden die durch die Services zu erzielenden Nutzen in sieben Nutzenkategorien aufgeteilt. Die für den Einsatz der Services innerhalb des Service-Systems benötigten Daten sowie deren Struktur und Beziehungen liegen als konzeptionelles Datenmodell vor. Die Fünf-Schichten-IoT-Architektur baut auf den erstellten Ergebnissen auf und berücksichtigt sowohl die Teilfunktionen als auch das konzeptionelle Datenmodell in ihrer Struktur. Ebenso sind die benötigten Ressourcen zur Realisierung der Funktionalitäten und das erstellte Berechtigungskonzept zur Nutzung des Service-Systems in den Aufbau der einzelnen Schichten mit eingearbeitet.

Das Hauptergebnis dieser Arbeit, die Fünf-Schichten-IoT-Architektur, besteht aus der *intelligente Objekte-*, *Kommunikations-*, *Cloud & Applikations-*, *Client-* und *Anwenderschicht*. In der untersten Schicht, der *intelligente Objekte-Schicht*, werden, u. a. mithilfe des intelligenten, modularen Sonderladungsträgers, relevante Daten vom Behälter-Pooling über den Einsatz des Ladungsträgers bis zum Recycling der wiederverwendbaren Module gesammelt. Diese Daten werden daraufhin über einen standardisierten Kommunikationsablauf, realisiert durch die *Kommunikationsschicht*, an die *Cloud & Applikationsschicht* übertragen. Dort werden die Daten gespeichert, verarbeitet und in Form von datenbasierten Services bereitgestellt. Die Architektur verwendet ein zentrales Cloudsystem, welches dem Anwender einen einfachen Zugriff auf die aufbereiteten Daten über eine webbasierte Darstellung oder eine eingebundene Softwareanwendung ermöglicht. Sowohl die webbasierte Visualisierung als auch die Softwareanwendung sind Bestandteile der sogenannten *Clientschicht*. Die oberste Schicht, die *Anwenderschicht*, besteht aus Rollen und Akteuren und zielt auf eine einfache, unternehmensübergreifende Realisierung und Nutzung des Service-Systems ab. Aufbauend auf den Rollen der *Anwenderschicht* gewährleistet das Berechtigungskonzept durch die Kombination von Rollen und Situationsregeln eine dynamische Regelung der Datenzugriffsberechtigungen im Service-System.

Die anschließende erfolgreiche prototypische Implementierung von Teilumfängen der Fünf-Schichten-IoT-Architektur zeigte, dass alle Komponenten für die Umsetzung und den Einsatz der Services berücksichtigt wurden. Der Prototyp der konzeptionierten Ar-

chitektur erlaubte es sowohl für den aktiven Behälterkreislauf zwischen OEM und Zulieferer als auch im Labor prozessrelevante Daten zu sammeln und diese dem Anwender gebündelt als Services über die Cloud-Plattform bereitzustellen. Dabei wurde eine weitgehend sichere und zuverlässige Datenerfassung, -verarbeitung und -übertragung vom intelligenten, modularen Sonderladungsträger auf der Shopfloor-Ebene bis hin zur Visualisierung in der Webanwendung realisiert. Darüber hinaus erfüllt die konzipierte Fünf-Schichten-IoT-Architektur alle eingangs identifizierten Anforderungen und ermöglicht laut dem Ergebnis der durchgeführten Umfrage eine Verbesserung der Behältermanagementprozesse, der Kundenzufriedenheit und der ökologischen Nachhaltigkeit. Konkret können durch den Einsatz der Services eine deutliche Transparenzsteigerung bzgl. der Behälterbestände und eine Automatisierung manueller Behältermanagementprozesse und Dokumentationen innerhalb der Lieferkette erreicht werden. Auch ist es möglich den Anwender frühzeitig auf auftretende Probleme, bspw. einen Schadensfall, durch die Überwachung von Zustandsgrößen hinzuweisen. Außerdem sind langfristig eine Reduktion von Schäden und des damit verbundenen Reparaturaufwands durch die datenunterstützte Ursachenforschung realisierbar. Parallel dazu erlaubt das Service-System als Teil der Fünf-Schichten-IoT-Architektur eine klare Verantwortungsverteilung im Schadensfall. Durch die gestiegene Transparenz bei der Behälterherstellung und beim Einsatz kommt es auch zu einer Steigerung der Kundenzufriedenheit. Ebenso kann, dank der Modularität des intelligenten, modularen Sonderladungsträgers und der damit verbundenen Wiederverwendbarkeit von Modulen, ein Beitrag zur ökologischen Nachhaltigkeit des Behältermanagements erzielt werden.

Weiterer Forschungsbedarf ergibt sich im Hinblick auf den Pooling-Betrieb für die intelligenten, modularen Sonderladungsträger. Hier bleibt noch die Frage unbeantwortet, wie eine sinnvolle Mengenflexibilität und die damit verbundenen Ad-hoc-Bereitstellungen von intelligenten, modularen Sonderladungsträgern realisiert werden können. In diesem Zusammenhang sind Art und Ort der Lagerung zu klären. Sinnvoll ist dabei die Erstellung von Prognosemodellen für die Abschätzung zukünftiger Modulbedarfe, um benötigte Module rechtzeitig produzieren zu können. Hier spielt vor allem die Wiederverwendung der eingesetzten Module eine große Rolle. So gilt es die Frage, welche und wie viele dieser Module nach dem ersten vollständigen Einsatzzyklus wiederverwendet werden können, zu beantworten. Auch ist noch ungeklärt, ob sich diese Module für einen weiteren, ganzen Einsatzzyklus eignen oder aufgrund der Verschleißerscheinungen früher ausgetauscht werden müssen. Dabei kann die Auswertung der Einsatzdaten der einzelnen Module bereits Hinweise liefern, ob und wie lange diese noch verwendet werden können. Ebenso können diese Daten in die Prognosemodelle eingebaut werden, um genauere Aussagen für die zukünftigen Modulbedarfe treffen zu können.

Zudem besteht noch weiterer Forschungsbedarf in Bezug auf die tiefergehende Datenanalyse und -auswertung der durch die Fünf-Schichten-IoT-Architektur akquirierten Daten. Auf Basis der durch die prototypische Implementierung gesammelten Daten können u. a. Methoden und Werkzeuge des Data-Minings²⁴ (vgl. [Rut-2020]) eingesetzt werden, um die gewonnenen Datensätze strukturiert zu analysieren und auszuwerten. So können Muster erkannt und Rückschlüsse auf Optimierungspotenziale für das Behältermanagement oder die Produktion gezogen werden. Auch die darauf aufbauende Integration der Echtzeit-Daten in einen digitalen Zwilling des Behälterkreislaufs sollte Gegenstand weiterer Forschungen sein. So können durch die Simulation zukünftiger Produktionsbedarfe bereits vorab zuverlässige Aussagen über Behälterbedarfe und damit über die Anzahl der zukünftig benötigten intelligenten, modularen Sonderladungsträger aus dem Pooling-System getroffen werden. Thema weiterführender Untersuchungen kann zudem auch die Konzeption einer automatisierten Behältersteuerung sein, welche auf der Grundlage der Bedarfssimulationen mit dem digitalen Zwilling Anweisungen zum Ausgleich der physischen Behälterbestände ableitet.

Eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung sowohl des Pooling-Betriebs als auch der konzipierten Services war nicht Gegenstand der vorliegenden Forschungsarbeit. Hier gilt es zu klären, inwieweit die nicht direkt quantifizierbaren Nutzen der Services monetär umgerechnet werden können, um den zukünftigen Anwendern ein konkretes Kosten-Nutzen-Verhältnis aufzeigen zu können. Dabei stehen folgende Fragen im Vordergrund: Wer betreibt das Service-System? Welche Art von Geschäftsmodell steht dahinter? Wie werden die Güter bzw. Geldflüsse zwischen den Akteuren (bspw. zwischen Reparaturdienstleister und Modulhersteller) geregelt?

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit tragen zur zukünftigen Verbesserung der Situation im Behältermanagement bei. Sie zeigen einen Weg auf, um die Potenziale von intelligenten, modularen Sonderladungsträgern zu erschließen und stellen gleichzeitig den Ausgangspunkt für weitere Forschungsarbeiten in diesem Themenfeld dar.

²⁴ Data-Mining, als interdisziplinäres Teilgebiet der Informatik, beschäftigt sich mit der Entwicklung von Methoden und Werkzeugen zur Wissensgenerierung aus großen Datenmengen [Rut-2020, S. 13].

Literaturverzeichnis

- [Ade-2017] Adelantado, F.; Vilajosana, X.; Tuset-Peiro, P.; Martinez, B.; Melia-Segui, J.; Watteyne, T.: Understanding the Limits of LoRaWAN. In: IEEE Communications Magazine, Jg. 55 (2017) Nr. 9, S. 34–40.
- [Ado-2015] Adolphs, P.; Epple, U.; Bedenbender, H.; Dirzus, D.; Ehlich, M.; Hankel, M.; Heidel, R.; Hoffmeister, M.; Huhle, H.; Kärcher, B.; Koziol, H.; Pichler, R.; Pollmeier, S.; Schewe, F.; Walter, A.; Waser, B.; Wollschlaeger, M.: Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0) – Statusreport, Aufruf am 14.04.2018.
- [Alq-2018] Alqinsi, P.; Matheus Edward, I. J.; Ismail, N.; Darmalaksana, W.: IoT-Based UPS Monitoring System Using MQTT Protocols. In: IEEE (Hrsg.): 2018 4th International Conference on Wireless and Telematics (ICWT), S. 1–5.
- [Alt-2011] Alter, S.: Metamodel for Service Design and Service Innovation: Integrating Service Activities, Service Systems, and Value Constellations. In: IEEE (Hrsg.): ICIS 2011 Proceedings, 2011.
- [Ang-2012] Angelov, S.; Grefen, P.; Greefhorst, D.: A framework for analysis and design of software reference architectures. In: Information and Software Technology, Jg. 54 (2012) Nr. 4, S. 417–431.
- [Arn-2008] Arnold, D.; Isermann, H.; Kuhn, A.; Tempelmeier, H.; Furmans, K.: Handbuch Logistik. Springer, Berlin, 2008.
- [Att-2011] Attig, P.: Komplexitätsreduktion in der Logistik durch modulare Sonderladungsträger. Apprimus-Verl., Aachen, 2011.
- [Aug-2016] Augustin, A.; Yi, J.; Clausen, T.; Townsley, W. M.: A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things. In: Sensors, Jg. 16 (2016) Nr. 9
- [Aut-2019] Automobil Produktion: Nachschub sichern – Spezial - Logistik 4.0. In: Automobil Produktion (2019) Nr. 3, S. 46–47.
- [Bab-2004] Babar, M. A.; Gorton, I.: Comparison of Scenario-Based Software Architecture Evaluation Methods. In: IEEE (Hrsg.): 11th Asia-Pacific Software Engineering Conference, 2004, S. 600–607.

- [Bar-2006] Barros, A. P.; Dumas, M.: The Rise of Web Service Ecosystems. In: IT Professional, Jg. 8 (2006) Nr. 5, S. 31–37.
- [Bar-2016] Bardyn, J.-P.; Melly, T.; Seller, O.; Sornin, N.: IoT: The era of LPWAN is starting now. In: IEEE (Hrsg.): ESSCIRC Conference 2016, Piscataway, NJ, 2016, S. 25–30.
- [Bau-2011] Baun, C.; Kunze, M.; Nimis, J.; Tai, S.: Cloud Computing – Web-basierte dynamische IT-Services. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011.
- [Bau-2013] Bauer, M.; Boussard, M.; Bui, N.; Carrez, F.; Meissner, S.; Olivereau, A.; Joachim, W.; Stefa, J.; Salinas, A.; Thoma, M.; Nettsträter, A.; Magerkurth, C.; Loof, J.; Jardak, C.: Internet of Things – Architecture IoT-A Deliverable D1.5 – Final architectural reference model for the IoT v3.0, 2013.
- [Bau-2014] Bauernhansl, T.; Hompel, M. ten; Vogel-Heuser, B.: Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik – Anwendung · Technologien · Migration. Springer, Dordrecht, 2014.
- [Bau-2015] Baun, C.: Computernetze kompakt. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2015.
- [Bau-2019] Baumann, P.: Ausgewählte Sensorschaltungen. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2019.
- [Bau-2020] Bauer, N.: Kapitel 1: Einführung in die Automobilindustrie – Vorlesung Logistik in der Automobilindustrie. Technische Universität München, 2020.
- [Ben-2006] Benantar, M.: Access control systems – Security, identity management and trust models. Springer Science+Business Media Inc, Boston, MA, 2006.
- [BIT-2013] BITKOM - Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e. V.: Eckpunkte für sicheres Cloud Computing – Leitfaden für die Auswahl vertrauenswürdiger Cloud Service Provider, 2013.
- [Ble-2009] Blessing, L. T.; Chakrabarti, A.: DRM, a Design Research Methodology. Springer London, London, 2009.

- [Böh-2009] Böhm, M.; Leimeister, S.; Riedl, C.; Krcmar, H.: Cloud Computing: Outsourcing 2.0 oder ein neues Geschäftsmodell zur Bereitstellung von IT-Ressourcen? In: IM-Fachzeitschrift für Information Management und Consulting, Jg. 24 (2009), S. S. 6-14.
- [Böh-2014] Böhm, T.; Leimeister, J. M.; Möslin, K.: Service-Systems-Engineering. In: Wirtschaftsinformatik, Jg. 56 (2014) Nr. 2, S. 83–90.
- [Bor-2016] Bor, M. C.; Roedig, U.; Voigt, T.; Alonso, J. M.: Do LoRa Low-Power Wide-Area Networks Scale? In: Zomaya, A.; Min, G.; Loureiro, A. F. (Hrsg.): Proceedings of the 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems, New York, NY, USA, 11.13.2016, S. 59–67.
- [Bun-2005] Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik: Risiken und Chancen des Einsatzes von RFID-Systemen, 2005.
- [Bun-2014] Bundesnetzagentur: Allgemeinzuteilung von Frequenzen zur Nutzung durch Funkanwendungen geringer Reichweite (SRD), 2014.
- [Bun-2016] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): IT-Sicherheit für die Industrie 4.0 – Produktion, Produkte, Dienste von morgen im Zeichen globalisierter Wertschöpfungsketten, 2016.
- [Bun-2019] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: Instandhaltung – Technische Regeln für Betriebssicherheit, 2019.
- [Bur-2011] Burggräf, P.; Gartz, T.; Brökelmann, I.; Ivanescu, S.: Modulares Konzept erhöht Effizienz in der Logistik. In: Industrieanzeiger, Jg. 2011 (2011) Nr. 25, S. 42–43.
- [Cho-2007] Chow, H. K.; Choy, K. L.; Lee, W. B.; Chan, F. T.: Integration of web-based and RFID technology in visualizing logistics operations – a case study. In: Supply Chain Management: An International Journal, Jg. 12 (2007) Nr. 3, S. 221–234.
- [Cho-2020] Choi, T.; Rogers, D.; Vakil, B.: Coronavirus Is a Wake-Up Call for Supply Chain Management. Harvard Business Review, Special Coverage: Coronavirus, 2020.
- [Der-2009] Dern, G.: Management von IT-Architekturen – Leitlinien für die Ausrichtung, Planung und Gestaltung von Informationssystemen. Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2009.

- [Deu-2020] Deutsche Telekom IoT GmbH: Low Cost Tracker. <https://iot.telekom.com/de/loesungen/low-cost-tracker>, Aufruf am 10.08.2020.
- [DIN-13199-1] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN EN 13199-1- Kleinladungsträgersysteme. DIN EN Nr. 13199-1, 2000.
- [DIN-13429] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN EN 13429 - Verpackung Wiederverwendung. DIN EN Nr. 13429, 2004.
- [DIN-30781-1] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN 30781-1 - Transportkette Grundbegriffe. DIN Nr. 30781-1, 1989.
- [DIN-30820-1] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN 30820-1 - Klein-Ladungs-Träger-System (KLT-System). DIN Nr. 30820-1, 1991.
- [Dro-2017] Drossel, W.-G.; Ihlenfeldt, S.; Langer, T.; Dumitrescu, R.: Cyber-Physische Systeme. In: Neugebauer, R. (Hrsg.): Digitalisierung. Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2017, S. 197–222.
- [Ele-2006] Electronic Commerce Centrum Stuttgart-Heilbronn: RFID- Anwenderbeispiel Volkswagen AG – RFID – Atlas Anwendungsbeispiele im deutschsprachigen Raum, 2006.
- [Emm-2012] Emmerich, J. S.; Roidl, M.; Bich, T.; Hompel, M. ten: Entwicklung von energieautarken, intelligenten Ladehilfsmitteln am Beispiel des inBin. In: Logistics Journal Proceedings (2012)
- [Eur-2016] Euro-Log: Neues Behältermanagement – Unternehmensübergreifende Ladungsträgerbewegungen. In: Midrange Magazin (2016) Nr. 05, S. 36.
- [Fah-2020] Fahrni, S.; Jansen, C.; John, M.; Kasah, T.; Körber, B.; Mohr, N.: Coronavirus: Industrial IoT in challenging times – The Industrial Internet of Things can help companies navigate the current crisis and emerge stronger once operations ramp up again. McKinsey & Company, 2020.
- [Fin-2015] Finkenzeller, K.: RFID-Handbuch – Grundlagen und praktische Anwendungen von Transpondern, kontaktlosen Chipkarten und NFC. Hanser, München, 2015.
- [Fis-2000] Fischer, S.; Rensing, C.; Rödiger, U. (Hrsg.): Open Internet Security. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2000.

- [Fle-2005] Fleisch, E.; Mattern, F.: Das Internet der Dinge – Ubiquitous Computing und RFID in der Praxis: Visionen, Technologien, Anwendungen, Handlungsanleitungen. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2005.
- [Fot-2021] Fottner, J.; Clauer, D.; Hormes, F.; Freitag, M.; Beinke, T.; Overmeyer, L.; Gottwald, S. N.; Elbert, R.; Sarnow, T.; Schmidt, T.; Reith, K. B.; Zedek, H.; Thomas, F.: Autonomous Systems in Intralogistics – State of the Art and Future Research Challenges. Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V, 2021.
- [Fra-2014] Fraunhofer IML: Abschlussbericht zum Verbundprojekt smaRTI - Smart Reusable Transport Items, 2014.
- [Gay-2018] Gayko, J.; Leboucher, Y.; Wei, S.; Wang, C.: Alignment Report for Reference Architectural Model for Industrie 4.0/ Intelligent Manufacturing System Architecture – Sino-German Industrie 4.0/ Intelligent Manufacturing Standardisation Sub-Working Group, 2018.
- [Geh-2007] Gehr, F.; Hellingrath, B.: Logistik in der Automobilindustrie – Innovatives Supply Chain Management für wettbewerbsfähige Zulieferstrukturen. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [Gei-2012] Geisberger, E.; Broy, M.: agendaCPS – Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems, 2012.
- [Gol-2019] Goldmann, E.; Graß, M.; Neumann, H.: Entwicklung datenbasierter Dienstleistungen zur Umsetzung eines unternehmensübergreifenden C-Teile-Managements. In: Stich, V., et al. (Hrsg.): Digitale Dienstleistungsinnovationen. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2019, S. 209–223.
- [Göp-2017] Göpfert, I.; Braun, D.; Schulz, M. (Hrsg.): Automobillogistik – Stand und Zukunftstrends. Springer Gabler, Wiesbaden, 2017.
- [Gra-2020] Graß, M.; Falter, L.; Harth, A.; Naumann, V.; Zink, M.; Fottner, J.; Zeiler, J.; Meißner, S.; Romer, M.; Schlittenbauer, S.; Seitz, R.; Voigt, G.: "Netzwerk für intelligente, modulare Sonderladungsträger": Schlussbericht iSLT.NET. TIB - Technische Informationsbibliothek Universitätsbibliothek Hannover, 2020.
- [GS1-2015] GS1: The GS1 EPCglobal Architecture Framework – GS1 Version 1.7 dated 18 April 2015, 2015.

- [GS1-2016] GS1: EPC Information Services (EPCIS) Standard, 2016.
- [Gud-2005] Gudehus, T.: Logistik – Grundlagen, Strategien, Anwendungen. Springer, Berlin, 2005.
- [Gun-2011] Gunnlaugsson, V. N.; Thakur, M.; Forås, E.; Ringsberg, H.; Gran-Larsen, Ø.; Margeirsson, S.: EPCIS standard used for improved traceability in the redfish value chain. In: Strandhagen, J.; Bjartnes, R.; Dreyer, H. (Hrsg.): Proceedings of The 13th International MITIP Conference The Modern Information Technology in the Innovation Processes of the Industrial Enterprises. Fagbokforlaget, Norwegen, 2011.
- [Gün-2017] Günthner, W.; Klenk, E.; Tenerowicz-Wirth, P.: Adaptive Logistiksysteme als Wegbereiter der Industrie 4.0. In: Vogel-Heuser, B.; Bauernhansl, T.; Hompel, M. ten (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0. Springer Vieweg, Berlin, 2017, S. 99–125.
- [Gup-2016] Gupta, N.: Inside bluetooth low energy. Artech House, Boston, London, 2016.
- [Gut-2018] Guth, J.; Breitenbücher, U.; Falkenthal, M.; Fremantle, P.; Kopp, O.; Leymann, F.; Reinfurt, L.: A Detailed Analysis of IoT Platform Architectures: Concepts, Similarities, and Differences. In: Di Martino, B., et al. (Hrsg.): Internet of Everything. Springer Singapore, Singapore, 2018, S. 81–101.
- [Han-2013] Handfield, R.; Straube, F.; Pfohl, H.-C.; Wieland, A.: Vorteile im Wettbewerb durch Beherrschung von Komplexität – Trends und Strategien in Logistik und Supply Chain Management. DVV Media Group, Hamburg, 2013.
- [Hat-2007] Hatton, S.: Early Prioritisation of Goals. In: Hainaut, J.-L., et al. (Hrsg.): Advances in Conceptual Modeling – Foundations and Applications. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2007, S. 235–244.
- [Hei-2020] Heilmann, R.: Kenngrößen des Rauschens. In: Heilmann, R. (Hrsg.): Rauschen in der Sensorik. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH; Springer Vieweg, Wiesbaden, 2020, S. 1–16.

- [Hit-2005] Hitz, M.; Kappel, G.; Kapsammer, E.; Retschitzegger, W.: UML@Work – Objektorientierte Modellierung mit UML 2. dpunkt.verlag, 2005.
- [Hof-2006] Hofmann, E.; Bachmann, H.: Behälter-Management in der Praxis – State-of-the-art und Entwicklungstendenzen bei der Steuerung von Ladungsträgerkreisläufen. Dt. Verkehrs-Verl., Hamburg, 2006.
- [Hom-2015] Hompel, M. ten: Keine App - kein Geschäft. Interview mit Prof. Dr. Michael ten Hompel zum Beginn der EXCHAIINGE 2015. Frankfurt. Vogel, K. Expertengespräch am 02.11.2015.
- [Hom-2018] Hompel, M. ten; Schmidt, T.; Dregger, J.: Materialflusssysteme – Förder- und Lagertechnik. Springer Vieweg, Berlin, 2018.
- [Hu-2014] Hu, V. C.; Ferraiolo, D.; Kuhn, R.; Schnitzer, A.; Sandlin, K.; Miller, R.; Scarfone, K.: Guide to Attribute Based Access Control (ABAC) Definition and Considerations – NIST Special Publication 800-162, 2014.
- [Hub-2013] Huber, A.: Erhöhung der Logistikeffizienz durch die Einführung eines Modularen Sonderladungsträgers in der LKW-Produktion der MAN Truck&Bus AG, 2013.
- [Iac-2019] Iacob, M.-E.; Charismadiptya, G.; van Sinderen, M.; Piest, J. P. S.: An Architecture for Situation-Aware Smart Logistics. In: IEEE (Hrsg.): 2019 IEEE 23rd International Enterprise Distributed Object Computing Workshop (EDOCW), S. 108–117.
- [IBM-2010] IBM Global Technology Services: RFID-gestütztes Management für Motorladungsträger (MLT) bei der Daimler AG, Mercedes-Benz Werk Berlin, 2010.
- [Ihm-2017] Ihme, J.; Bösche, S.; Strauß, C.: Elektromobilität und Automobillogistik. In: Göpfert, I.; Braun, D.; Schulz, M. (Hrsg.): Automobillogistik. Springer Gabler, Wiesbaden, 2017, S. 425–459.
- [Ind-2018] Industrial Communication for Factories (IC4F): Building Blocks for a Secure Real-Time Communication and Computing Infrastructure for Industry 4.0 – White Paper. <https://www.ic4f.de/whitepaper/IC4F-WP-Building-Blocks.pdf>, Aufruf am 09.04.2020.

- [Ind-2019] Industrial Internet Consortium: The Industrial Internet of Things Volume G1: Reference Architecture – Version 1.9. <https://www.iiconsortium.org/pdf/IIRA-v1.9.pdf>, Aufruf am 09.04.2020.
- [Int-2012a] International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector (ITU-T): Overview of the Internet of things – Next Generation Networks - Frameworks and functional architecture models, Series Y: Global information infrastructure, Internet protocol aspects, next-generation networks, Internet of Things and smart cities Nr. Y.2060, 2012.
- [Int-2012b] International Labour Office: Structure, group definitions and correspondence tables. International Labour Office, Geneva, 2012.
- [ISO-2382] ISO/IEC Joint Technical Committee for Information Technology: ISO/IEC 2382 - Information technology - Vocabulary. ISO/IEC Nr. 2382, 2015.
- [Jar-2016] Jarosch, H.: Grundkurs Datenbankentwurf. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2016.
- [Jor-1996] Jordan, P. W.; Thomas, B.; McClelland, I. L.; Weerdmeester, B.: Usability Evaluation In Industry. CRC Press, 1996.
- [Kab-2017] Kabza, A.; Fleischhammer, M.; Brandt, K.; Herrmann, M.; Mettlach, H.; Grothues, G.; Tübke, J.; Krampfert, M.; Wagner, A.; Garche, J.; Sauer, A.; Wilhelm, S.: Studie zur Bewertung der Sicherheit von Lithium-Ionen-Batterien über den gesamten Lebenszyklus – Abschlussbericht, 2017.
- [Kag-2013] Kagermann, H.; Wahlster, W.; Helbig, J.: Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 – Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0. acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V., 2013.
- [Kam-2011] Kampker, A.; Franzkoch, B.; Wesch-Potente, C.; Brökelmann, I.: Re-Box-Pool - Innovative logistic concept based on a modular loading carrier concept. IEEE, Piscataway, NJ, 2011.
- [Kam-2012] Kampker, A.; Burggräf, P.; Swist, M.; Ivenscu, S.: Geschäftsmodell für den Betrieb von Pools modularer Sonderladungsträger. In: ZWF Zeitschrift für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jg. 107 (2012) Nr. 12, S. 932–936.

- [Kes-2019] Kessler, R.; van der Ahe, F.; Suske, J.; Marx Gómez, J.: Einbindung von intelligenten Ladungsträgern in Prozesse der Intralogistik. In: HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik, Jg. 56 (2019) Nr. 3, S. 574–586.
- [Kim-2008] Kim, S. J.; Deng, G.; Gupta, S. K.; Murphy-Hoye, M.: Intelligent networked containers for enhancing global supply chain security and enabling new commercial value. In: IEEE (Hrsg.): 2008 3rd International Conference on Communication Systems Software and Middleware and Workshops (COMSWARE '08), S. 662–669.
- [Klu-2016] Klug, F.: Erfolgspotenzial Behältermanagement. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jg. 111 (2016) Nr. 7-8, S. 466–469.
- [Klu-2018] Klug, F.: Logistikmanagement in der Automobilindustrie – Grundlagen der Logistik Im Automobilbau. Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2018.
- [Krc-2015] Krcmar, H.: Informationsmanagement. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2015.
- [Kuc-2014] Kuckartz, U.: Mixed Methods. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2014.
- [Kur-2018] Kuras, M.: Was bedeutet Luftfracht für Deutschland? – Eine Analyse der volkswirtschaftlichen Bedeutung, der Funktionsweise, der Prozesse sowie des Wettbewerbs im Luftfrachtverkehr. Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft e. V., 2018.
- [Lam-2013] Lammers, W.; Thiele, B.; Pelka, M.: Schlussbericht: Service-orientiertes Logistikkonzept für ein multifunktionales Behältersystem. TU Dortmund, Fakultät Maschinenbau, Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen, 2013.
- [Lan-2011] Lang, W.; Jedermann, R.; Mrugala, D.; Jabbari, A.; Krieg-Brückner, B.; Schill, K.: The “Intelligent Container” - A Cognitive Sensor Network for Transport Management. In: IEEE Sensors Journal, Jg. 11 (2011) Nr. 3, S. 688–698.
- [Lee-2015] Lee, J.-S.; Dong, M.-F.; Sun, Y.-H.: A preliminary study of low power wireless technologies: ZigBee and Bluetooth Low Energy. In: IEEE (Hrsg.): 2015 IEEE 10th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2015, S. 135–139.

- [Lei-2020] Leimeister, J. M. (Hrsg.): Dienstleistungsengineering und -management – Data-driven Service Innovation. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2020.
- [Len-2009] Lenk, A.; Klems, M.; Nimis, J.; Tai, S.; Sandholm, T.: What's inside the Cloud? An architectural map of the Cloud landscape. In: IEEE (Hrsg.): 2009 ICSE Workshop on Software Engineering Challenges of Cloud Computing, S. 23–31.
- [Lia-2017] Liao, Y.; Deschamps, F.; Loures, E. d. F. R.; Ramos, L. F. P.: Past, present and future of Industry 4.0 - a systematic literature review and research agenda proposal. In: International Journal of Production Research, Jg. 55 (2017) Nr. 12, S. 3609–3629.
- [Lin-2019] Linnemann, M.; Sommer, A.; Leufkes, R.: Einsatzpotentiale von LoRaWAN in der Energiewirtschaft. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2019.
- [LoR-2018] LoRa Alliance Technical Committee: LoRaWAN Specification 1.0.3, 2018.
- [Mas-2009] Masak, D.: Grundlagen der Serviceorientierung. In: Dieter Masak (Hrsg.): Digitale Ökosysteme. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2009, S. 11–112.
- [Mei-2015] Meißner, S.: Adaptive Materialflusstechnik. Modulare Transportwagen und Sonderladungsträger für die Materialbereitstellung. In: VDI - Verein Deutscher Ingenieure e.V. (Hrsg.): 24. Deutscher Materialfluss-Kongress. VDI-Verl., Düsseldorf, 2015, S. 93–99.
- [Mei-2018] Meißner, S.; Romer, M.: Neue Geschäftsmodelle durch intelligente Ladungsträger und datenbasierte Dienstleistungen. In: Barton, T.; Müller, C.; Seel, C. (Hrsg.): Digitalisierung in Unternehmen. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2018, S. 49–65.
- [Mel-2010] Melzer, I.: Service-orientierte Architekturen mit Web Services. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 2010.
- [Mel-2011] Mell, P. M.; Grance, T.: The NIST definition of cloud computing, 2011.
- [Mis-2020] Mishra, B.; Kertesz, A.: The Use of MQTT in M2M and IoT Systems: A Survey. In: IEEE Access, Jg. 8 (2020), S. 201071–201086.

- [Mor-2018] Morwind, M.; Richardson, M.: Workshop von Microsoft Azure – Cloudeinsatz und Architektur. Microsoft, München. Zeiler, J. Expertengespräch am 31.01.2018.
- [Mün-2016] Münch, U.: CairGoLution: Echtzeittransparenz 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.
- [Nau-2018] Naumann, V.; Pflaum, A.: Lebenszykluskosten und das Internet of Things. In: Nadig, L.; Egle, U. (Hrsg.): CARF Luzern 2018. Verlag IFZ – Hochschule Luzern, Luzern, 2018, S. 75–91.
- [Nea-2019] Neal, A. D.; Sharpe, R. G.; Conway, P. P.; West, A. A.: smaRTI - A cyber-physical intelligent container for industry 4.0 manufacturing. In: Journal of Manufacturing Systems, Jg. 52 (2019), S. 63–75.
- [Nea-2021] Neal, A. D.; Sharpe, R. G.; van Lopik, K.; Tribe, J.; Goodall, P.; Lugo, H.; Segura-Velandia, D.; Conway, P.; Jackson, L. M.; Jackson, T. W.; West, A. A.: The potential of industry 4.0 Cyber Physical System to improve quality assurance: An automotive case study for wash monitoring of returnable transit items. In: CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Jg. 32 (2021), S. 461–475.
- [Nis-2018] Nishioka, Y.: IVRA Next – Strategic Implementation Framework of Industrial Value Chain for connected Industries, 2018.
- [Noa-2013] Noatzsch, K.; Souren, R.: Management von Behälterkreisläufen auf Basis der Verkehrsflussdynamik? – Eine Analogiebetrachtung von Messgrößen und Systemstrukturen. Univ.-Bibliothek; Verl. proWiWi, Ilmenau, 2013.
- [OAS-2019] OASIS: MQTT Version 5.0 – OASIS Standard, 2019.
- [Oli-2015] Oliveira, R. R.; Cardoso, I. M.; Barbosa, J. L.; da Costa, C. A.; Prado, M. P.: An intelligent model for logistics management based on geofencing algorithms and RFID technology. In: Expert Systems with Applications, Jg. 42 (2015) Nr. 15-16, S. 6082–6097.
- [Ōno-2013] Ōno, T.: Das Toyota-Produktionssystem – Das Standardwerk zur Lean Production. Campus-Verl., Frankfurt am Main, 2013.

- [Ott-2017] Otto, B.; Hompel, M. ten; Wrobel, S.: Industrial Data Space. In: Neugebauer, R. (Hrsg.): Digitalisierung. Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2017, S. 113–133.
- [Par-1998] Partsch, H.: Requirements-Engineering systematisch – Modellbildung für softwaregestützte Systeme. Springer, Berlin, 1998.
- [Pat-2015] Patidar, A.; Suman, U.: A survey on software architecture evaluation methods. In: IEEE (Hrsg.): 2015 2nd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom), 2015, S. 967–972.
- [Pel-2006] Pelich, C.: Einsatz aktiver RFID bei Volkswagen – Grundlagen, Einsätze und Erfahrungen. Vortrag. Volkswagen AG, Wolfsburg, 2006.
- [Pfo-2016] Pfohl, H.-C.; Kurnaz, T.: Echtzeittransparenz von Luftfahrt-Frachtströmen durch Einsatz eingebetteter Sensorik zur Überwachung einzelner Sendungselemente (CairGoLution), Teilvorhabentitel: Analyse von Prozessen und Risiken in der Luftfrachtkette und Einbettung der technischen Sicherheitslösung: Abschlussbericht "CairGoLution" Laufzeit des Vorhabens: Juli 2013-Dezember 2016, 2016.
- [Pie-2020] Piest, J. P. S.; Bemthuis, R. H.; Charismadiptya, G.: Demonstrating the Architecture for Situation-aware Logistics using Smart Returnable Assets. In: IEEE (Hrsg.): 2020 IEEE 24th International Enterprise Distributed Object Computing Workshop (EDOCW), S. 86–90.
- [Pis-2020] Pistorius, J.: Industrie 4.0 – Schlüsseltechnologien für die Produktion. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2020.
- [Ple-2017] Plenk, V.: Angewandte Netzwerktechnik kompakt. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2017.
- [Por-2014] Porter, M. E.; Heppelmann, J. E.: How Smart, Connected Products Are Transforming Competition. In: Harvard Business Review (2014) Nr. 11
- [Pri-2016] Prives, S.: Systemkonzept zur Steigerung logistischer Effizienz im Lebensmitteleinzelhandel durch Einsatz intelligenter Behälter. Dissertation. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, München, 2016.

- [que-2020] queo GmbH: Verbundvorhaben: SaSCh - Digitale Services zur Gestaltung agiler Supply Chains Teilvorhaben: Digitale Services und deren Integration in bestehende Netzwerke: Sachbericht, 2020.
- [Raz-2017] Raza, U.; Kulkarni, P.; Sooriyabandara, M.: Low Power Wide Area Networks: An Overview. In: IEEE Communications Surveys & Tutorials, Jg. 19 (2017) Nr. 2, S. 855–873.
- [Rei-2013] Reinhart, G.: 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. Technische Universität München, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, 2013.
- [Rei-2018] Reidt, A.; Pfaff, M.; Krcmar, H.: Der Referenzarchitekturbegriff im Wandel der Zeit. In: HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik, Jg. 55 (2018) Nr. 5, S. 893–906.
- [Roi-2014] Roidl, M.; Emmerich, J.; Masoudinejad, M.; Riesner, A.; Hompel, M.: Entwicklung eines Versuchsfelds für große Systeme intelligenter Behälter, 2014.
- [Rom-2018] Romer, M.; Zeiler, J.; Meißner, S.; Fottner, J.: The Internet of Load Carriers - Design of a Cloud-based Service System for Smart and Connected Load Carriers. In: Springer International Publishing (Hrsg.): ICETE 2018. International Joint Conference on e-Business and Telecommunications, et al., Setúbal, Portugal, 2018, S. 332–339.
- [Ros-2016] Rosenthal, A.: Ganzheitliche Bewertung modularer Ladungsträgerkonzepte – Eine Lebenszyklusbetrachtung. Springer Fachmedien Wiesbaden; Imprint: Springer, Wiesbaden, 2016.
- [Ruc-2018] Ruckebusch, P.; Hoebeke, J.; Poorter, E. de; Moerman, I.: Smart container monitoring using custom-made WSN technology: from business case to prototype. In: EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, Jg. 2018 (2018) Nr. 1

- [Rut-2020] Rutkowski, L.; Jaworski, M.; Duda, P.: Stream Data Mining: Algorithms and Their Probabilistic Properties. Springer International Publishing, Cham, 2020.
- [San-1994] Sandhu, R. S.; Samarati, P.: Access control: principle and practice. In: IEEE Communications Magazine, Jg. 32 (1994) Nr. 9, S. 40–48.
- [San-1996] Sandhu, R. S.; Coyne, E. J.; Feinstein, H. L.; Youman, C. E.: Role-based access control models. In: Computer, Jg. 29 (1996) Nr. 2, S. 38–47.
- [San-2000] Sandhu, R.; Ferraiolo, D.; Kuhn, R.: The NIST model for role-based access control. In: Rebersburg, K.; Youman, C.; Atluri, V. (Hrsg.): Proceedings of the fifth ACM workshop on Role-based access control - RBAC '00, New York, NY, USA, 2000, S. 47–63.
- [Sau-2018] Sauter, M.: Grundkurs Mobile Kommunikationssysteme. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2018.
- [Sch-2005] Schmölzer, T.; Schöfer, J.: Bedarfsorientiertes Behältermanagement zur Kostenreduzierung in der Automobilindustrie. In: Zeitschrift für die gesamte Wertschöpfungskette Automobilwirtschaft, Jg. 2005 (2005) Nr. 4, S. 56–60.
- [Sch-2011] Scholz-Reiter, B.; Lappe, D.; Werthmann, D.: Sonderladungsträgermanagement in der Automobilindustrie. In: Industrie Management, Jg. 27 (2011) Nr. 6, S. 77–81.
- [Sch-2012] Schuh, G.: Schlussbericht ReBox-Pool: Logistikeffizienz durch rekonfigurierbare Sonderladungsträger, 2012.
- [Sch-2013a] Schmidbauer, B.: RFID-basierte Behältersteuerung: Abschlussbericht Projekt RAN (RFID-based Automotive Network); Use Case - Behältermanagement; Berichtszeitraum: von 01.01.2011 bis 31.12.2012, 2013.
- [Sch-2013b] Schulz, T.: Verbundprojekt: RAN - RFID-based Automotive Network/ Prozesse der Automobilindustrie transparent und optimal steuern, Teilprojekt: Standardisierte Datenstrukturen und KMU-konforme Konfigurationstools; Abschlussbericht zur Verbundvorhaben; Laufzeit: 01.01.2010 - 31.12.2012, 2013.

- [Sch-2015] Schuh, G.; Nyhuis, P.; Reuter, C.; Hauptvogel, A.; Schmitz, S.; Nywlt, J.; Brambring, F.; Schulte, F.; Hansen, J.: Produktionsdaten als Enabler für Industrie 4.0 – Gemeinsame Studie der produktionstechnischen Institute IFA, IPMT, Fraunhofer IWU und WZL. In: wt Werkstattstechnik online, Jg. 105 (2015) Nr. 4, S. 200–203.
- [Sch-2017] Schreiner, W.: Workshop Aufnahme IST-Prozesse. BMW AG, Dingolfing. Zeiler, J. Expertengespräch am 17.05.2017.
- [Sch-2019] Schreiner, R.: Computernetzwerke – Von den Grundlagen zur Funktion und Anwendung. Carl Hanser Verlag, München, 2019.
- [Sem-2015a] Semtech: LoRa Modulation Basics – AN1200.22, 2015.
- [Sem-2015b] Semtech: LoRaWAN Network Server Demonstration: Gateway to Server Interface Definition – ANNWS.01.2.1.W.SYS, 2015.
- [Sem-2018] Semtech: Migrating an Internet of Things (IoT) Sensor Design to LoRaWAN – White Paper, 2018.
- [Sha-2012] Shanmugapriya, P.; M. Suresh, R.: Software Architecture Evaluation Methods A Survey. In: International Journal of Computer Applications, Jg. 49 (2012) Nr. 16, S. 19–26.
- [Sha-2019] Sharpe, R.; van Lopik, K.; Neal, A.; Goodall, P.; Conway, P. P.; West, A. A.: An industrial evaluation of an Industry 4.0 reference architecture demonstrating the need for the inclusion of security and human components. In: Computers in Industry, Jg. 108 (2019), S. 37–44.
- [Sin-2017] Sinha, R. S.; Wei, Y.; Hwang, S.-H.: A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT. In: ICT Express, Jg. 3 (2017) Nr. 1, S. 14–21.
- [Spi-2017] Spinsante, S.; Ciattaglia, G.; Del Campo, A.; Perla, D.; Pignini, D.; Cancellieri, G.; Gambi, E.: A LoRa enabled building automation architecture based on MQTT. In: IEEE (Hrsg.): 2017 AEIT International Annual Conference, S. 1–5.
- [Str-2005] Strassner, M.: RFID im Supply Chain Management – Auswirkungen und Handlungsempfehlungen am Beispiel der Automobilindustrie. Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden, 2005.

- [Syd-2017] Sydow, A.: Dynamische Behälterlogistik. Dissertation, Shaker Verlag GmbH; Technische Universität Clausthal, 2017.
- [Tru-2018a] Trunzer, E.; Lötzerich, S.; Vogel-Heuser, B.: Concept and Implementation of a Software Architecture for Unifying Data Transfer in Automated Production Systems. In: Niggemann, O.; Schüller, P. (Hrsg.): IMPROVE - Innovative Modelling Approaches for Production Systems to Raise Validatable Efficiency. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2018, S. 1–17.
- [Tru-2018b] Trusted Cloud: Kriterienkatalog für Cloud Services – Version 2.0, 2018.
- [Tso-2017] Tsolkas, A.; Schmidt, K.: Rollen und Berechtigungskonzepte. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2017.
- [VDA-4500] VDA Verband der Automobilindustrie: VDA 4500 - Kleinladungsträger (KLT-) System. VDA Nr. 4500, 2018.
- [VDA-5007] VDA Verband der Automobilindustrie: VDA 5007 - Leitfaden zum Behältermanagement. VDA Nr. 5007, 2017.
- [VDE-2017] VDE ITG Informationstechnik: Funktechnologien für Industrie 4.0 – ITG AG Funktechnologie 4.0, 2017.
- [Ver-2019] Verdouw, C.; Sundmaeker, H.; Tekinerdogan, B.; Conzon, D.; Montanaro, T.: Architecture framework of IoT-based food and farm systems: A multiple case study. In: Computers and Electronics in Agriculture, Jg. 165 (2019), S. 1–26.
- [Vog-2013] Vogel-Heuser, B.; Diedrich, C.; Broy, M.: Anforderungen an CPS aus Sicht der Automatisierungstechnik. In: at – Automatisierungstechnik, Jg. 61 (2013) Nr. 10
- [Wan-2014] Wang, R.: Konzeption und Entwicklung eines EPC-basierten Daten-netzwerkes in der Lebensmittel-Supply-Chain. Dissertation. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, München, 2014.
- [Wey-2016] Weyrich, M.; Ebert, C.: Reference Architectures for the Internet of Things. In: IEEE Software, Jg. 33 (2016) Nr. 1, S. 112–116.

- [Wil-2020] Wilding, R.; Dohrmann, K.; Wheatley, M.: Post-coronavirus supply chain recovery – The journey towards the new normal. Deutsche Post DHL Group, 2020.
- [Wit-2018] Wittenbröker, S.; Bracht, U.: Logistikassistenzsystem im Behältermanagement. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jg. 113 (2018) Nr. 5, S. 316–322.
- [Wus-2015] Wustmann, D.; Kunz, R.: Behältermanagementsystem BinMan 2.0 – Automotive - Integration Behältermanagementsoftware, 2015.
- [Zaf-2017] Zafari, F.; Gkelias, A.; Leung, K.: A Survey of Indoor Localization Systems and Technologies, 2017.
- [Zaf-2019] Zafari, F.; Gkelias, A.; Leung, K. K.: A Survey of Indoor Localization Systems and Technologies. In: IEEE Communications Surveys & Tutorials, Jg. 21 (2019) Nr. 3, S. 2568–2599.
- [Zei-2018] Zeiler, J.; Romer, M.; Röschinger, M.; Fottner, J.; Meißner, S.: Entwicklung des Sonderladungsträgers der Zukunft. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jg. 113 (2018) Nr. 1-2, S. 37–40.
- [Zei-2019a] Zeiler, J.; Fottner, J.: Architectural Design for Special Load Carriers as Smart Objects in a Cloud-based Service System. In: IEEE (Hrsg.): 2019 IEEE 6th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA), 2019, S. 644–652.
- [Zei-2019b] Zeiler, J.; Scherer, F.; Fottner, J.: LoRaWAN als Kommunikationstechnologie für vernetzte Sonderladungsträger. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jg. 114 (2019) Nr. 5, S. 268–272.
- [Zei-2020a] Zeiler, J.; Mecklenburg, A.; Fottner, J.: Evaluation of a Service System for Smart and Modular Special Load Carriers within Industry 4.0. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of the International Conference on Innovative Intelligent Industrial Production and Logistics, S. 76–86.
- [Zei-2020b] Zeiler, J.; Fottner, J.: Implementierung und Test eines Service-Systems mit intelligenten, modularen Sonderladungsträgern. In: Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik e.V. (WGTL) (Hrsg.): Logistics Journal: Proceedings, 2020.

- [Zei-2020c] Zeiler, J.; Fottner, J.: Vernetzte Sonderladungsträger für die Logistik 4.0. In: Vogel-Heuser, B.; Bauernhansl, T.; Hompel, M. ten (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2020, S. 1–18.

Durch den Autor betreute studentische Arbeiten

Im Rahmen der durch diese Dissertation aufgegriffenen Forschungsthematik wurden nachfolgende Studienarbeiten erstellt. Die Anfertigung der Arbeiten wurde durch den Autor wissenschaftlich und inhaltlich angeleitet.

Kurzbeleg	Titel	Autor	Art	Abgabe
	Potenzial der RFID-Technologie für die Überwachung von Ladungsträgern im Kontext der Industrie 4.0	Kern, Lara	Semesterarbeit	2017
	Das Internet der Dinge in der Intralogistik: Entwicklung eines modularen Sensorgehäuses zur Ladungsträgerlokalisierung	Gürtner, Christoph	Semesterarbeit	2017
	Digitaler Zwilling – Echtzeitsynchronisation einer Anlagensimulation mittels Cloud Computing	Pfeiffer, Simon	Masterarbeit	2017
[fml-2018a]	Konzeption eines Datenmodells im Kontext der Industrie 4.0	Reidel, Tim	Masterarbeit	2018
[fml-2018b]	Konzeption eines Funktionsmodells für ein Entwicklungsprojekt in der Logistik im Kontext der Industrie 4.0	Durchner, Larissa	Semesterarbeit	2018
[fml-2018c]	Untersuchung des Potenzials der LPWAN- und RFID-Technologie zur intelligenten Überwachung von Sonderladungsträgern	Scherer, Felix	Bachelorarbeit	2018
[fml-2018d]	Erstellung eines Planungstools zur Entwicklung und Bewertung von Lagerkonzepten	Thum, Severin	Semesterarbeit	2018
[fml-2018e]	Konzeption eines Datenmodells für intelligente, modulare Sonderladungsträger im Kontext der Industrie 4.0	Tsimpoukakis, Panagiotis	Bachelorarbeit	2018
	Konzeption eines Datenflussmodells für intelligente Ladungsträger im Kontext der Industrie 4.0	Obermaier, Andreas	Masterarbeit	2018

Kurzbeleg	Titel	Autor	Art	Abgabe
	Versuche zur Untersuchung der Transport-, Lagerfähigkeit und Montageergonomie eines intelligenten, modularen Sonderladungsträgers im Projekt iSLT.NET	Looschen, Christian	Semesterarbeit	2018
	Erstellung eines Simulationsmodells für den Behälterkreislauf von intelligenten Behältern	Zhang, Siyi	Masterarbeit	2019
[fml-2019a]	Implementierung einer Kommunikationsinfrastruktur in der Logistik zur Überwachung und Ortung von intelligenten Ladungsträgern im Rahmen der Industrie 4.0	Kloibhofer, Christoph	Masterarbeit	2019
[fml-2019b]	Konzeptioneller Entwurf einer Systemarchitektur für das Projekt iSLT.NET in Anlehnung an bestehende Referenzarchitekturen im Kontext von Industrie 4.0	Luhn, Stephan	Masterarbeit	2019
[fml 2019c]	Simulation eines Lager- und Kommissioniersystems für die Komponenten- und Modullagerung eines intelligenten, modularen Ladungsträgers	Schmidt, Larissa	Masterarbeit	2019
	Realisierung einer energieeffizienten Indoor-Lokalisierung im industriellen Umfeld	Haentges, Joe	Semesterarbeit	2019
[fml-2020]	Evaluierung eines Service-Systems für intelligente, modulare Sonderladungsträger in der Logistik 4.0	Mecklenburg, Anja	Masterarbeit	2020
	Implikationen und Innovationsprozesse von Geschäftsmodellen in Industrie 4.0 – Wie werden Geschäftsmodelle in der Industrie 4.0 beeinflusst und innoviert?	Rose, Lukas	Semesterarbeit	2020

Abbildungsverzeichnis

Hauptteil

Abbildung 1-1: Sonderladungsträger für Beifahrerairbags [Zei-2020c, S. 2]	3
Abbildung 1-2: Struktureller und inhaltlicher Aufbau der Arbeit	9
Abbildung 2-1: Standardisierte Ladungsträger, KLT (links) und Euro-Gitterbox (rechts)	12
Abbildung 2-2: Beispielhafte Darstellung eines unternehmensübergreifenden, geschlossenen Behälterkreislaufs in der Automobilindustrie	14
Abbildung 2-3: St. Galler Behälter-Management Modell von Hofmann und Bachmann [Hof-2006, S. 22]	16
Abbildung 2-4: Aufbau eines Informationssystems nach Krcmar [Krc-2015, S. 22]	19
Abbildung 2-5: Aktionen und Rollen innerhalb einer SOA [in Anlehnung an Mel-2010, S. 14].	23
Abbildung 2-6: Servicemodelle des Cloud-Computings [in Anlehnung an Len-2009; You-2008]	25
Abbildung 2-7: Schematische Darstellung von RBAC ₀ [in Anlehnung an San-2000, S. 50]	28
Abbildung 2-8: Grundlegender Aufbau von ABAC [in Anlehnung an Hu-2014, S. 8]	30
Abbildung 2-9: Schematische Einordnung gängiger Funktechnologien anhand ihrer Reichweite und Datenrate [in Anlehnung an Ste-2019]	31
Abbildung 2-10: Einordnung von LoRaWAN in die Schichten des OSI-Modells [in Anlehnung an Sem-2018, S. 2; Sch-2019, S. 4]	33
Abbildung 2-11: Vereinfachte Netzwerktopologie von LoRaWAN [in Anlehnung an Sem-2018, S. 6]	35
Abbildung 2-12: Klassen an Endgeräten bei LoRaWAN [in Anlehnung an Sem-2018, S. 10]	37
Abbildung 3-1: Aufbau des modularen Sonderladungsträgers im Projekt ReBox-Pool [in Anlehnung an Kam-2011, S. 6]	42
Abbildung 3-2: Aufbau von RAMI4.0 [Ado-2015, S. 7]	46
Abbildung 3-3: Functional Viewpoint der IIRA [Ind-2019, S. 35]	48
Abbildung 3-4: Domain Model Viewpoint für den Anwendungsfall „Intelligent Fruit Logistics“ [Ver-2019, S. 21]	51
Abbildung 3-5: Datenübertragung vom RFID-Gate über das Intranet bis zum Infobroker [BIB-2013, S. 51]	53

Abbildung 3-6: Durchfahrt von intelligenten Thermobehältern durch ein RFID-Gate [Pri-2016, S. 146]	54
Abbildung 3-7: Integration diverser Technologien in einen KLT im Projekt SOBS [Lam-2013, S. 91]	56
Abbildung 3-8: Entwickeltes Dashboard mit aktuellen Behälterbeständen (B), statistischen Auswertungen (C,D) und Navigationsmenü (A) [Nea-2021, S. 470]	59
Abbildung 4-1: Wissenschaftliche, iterative Vorgehensweise und Zuordnung zur Kapitelstruktur	67
Abbildung 5-1: Vorgehen zur Anforderungsermittlung	70
Abbildung 5-2: Ist-Prozess der Behälterentwicklung und -herstellung von klassischen Sonderladungsträgern in der Automobilindustrie	72
Abbildung 5-3: Vereinfachter Ist-Prozess des Behältereinsatzes von klassischen Sonderladungsträgern in der Automobilindustrie	75
Abbildung 6-1: Vorgehensweise und eingesetzte Methoden zur Erstellung der Architektur für ein unternehmensübergreifendes Service-System	85
Abbildung 6-2: Services zur Erfüllung der Anforderungen	86
Abbildung 6-3: Legende der Funktionsmodellierung	87
Abbildung 6-4: Funktionsmodell des Service Pooling-System für imSLTs	88
Abbildung 6-5: Darstellung des Service Rekonfiguration	89
Abbildung 6-6: Funktionen des Service Recycling	90
Abbildung 6-7: Erstelltes Funktionsmodell für den Ablauf des Service Wartung	91
Abbildung 6-8: Darstellung des Service Reparatur anhand seiner Funktionen	92
Abbildung 6-9: Funktionsmodell des Service Reinigung mit Fokus auf Systemoperationen	94
Abbildung 6-10: Hierarchische Struktur der Funktionen des Service imSLT-Konfigurator	95
Abbildung 6-11: Darstellung des Service Auftragsverfolgung mit zugehörigen Funktionen	96
Abbildung 6-12: Funktionen des Service digitaler Schadensbericht	97
Abbildung 6-13: Funktionsumfang des Service aktuelle Positionen und Bestände	99
Abbildung 6-14: Funktionshierarchie des Service digitales Behältermanagement	100
Abbildung 6-15: Benötigte Funktionen für den Service automatisierte Buchung	102
Abbildung 6-16: Beschreibung der Funktionen des Service Zustandsüberwachung	103
Abbildung 6-17: Zusammenführung der gesammelten Daten im Service Lebenszyklusüberwachung	104

Abbildung 6-18: Vereinfachte Darstellung des konzeptionellen Datenmodells für die erarbeiteten Services und Funktionsumfänge	110
Abbildung 6-19: Legende für die erstellten UML-Klassendiagramme	111
Abbildung 6-20: Detaillierung des Bereichs Herstellung des konzeptionellen Datenmodells	113
Abbildung 6-21: Detaillierte Ansicht des Bereichs Einsatz (blau) im konzeptionellen Datenmodell	116
Abbildung 6-22: Detaillierung des grünen Bereichs (Berichte) im konzeptionellen Datenmodell	118
Abbildung 6-23: Schichtaufbau der Fünf-Schichten-IoT-Architektur [in Anlehnung an Zei-2019a]	119
Abbildung 6-24: Detaildarstellung der Schicht intelligente Objekte	120
Abbildung 6-25: Beispielhafte Modulaufteilung eines imSLT	121
Abbildung 6-26: Kommunikationsablauf in der zweiten Schicht der Fünf-Schichten-IoT-Architektur [in Anlehnung an Zei-2019a]	124
Abbildung 6-27: Cloud & Applikationsschicht der Fünf-Schichten-IoT-Architektur [in Anlehnung an Zei-2019a]	127
Abbildung 6-28: Clientschicht der konzipierten Fünf-Schichten-IoT-Architektur	129
Abbildung 6-29: Detaildarstellung der Anwenderschicht	132
Abbildung 6-30: Berechtigungszuweisung basierend auf dem RBAC-A role centric-Konzept	134
Abbildung 6-31: Situationsregel für eine dynamische Zugriffsregelung auf Positionsdaten	137
Abbildung 6-32: Beispielhafter Ablauf des Service Zustandsüberwachung innerhalb der Fünf-Schichten-IoT-Architektur	141
Abbildung 7-1: Evaluierungsplan und eingesetzte Methoden	144
Abbildung 7-2: Prototypische Implementierung der Fünf-Schichten-IoT-Architektur [in Anlehnung an Zei-2020b]	146
Abbildung 7-3: Prototyp des imSLT, ausgerüstet mit zwei verschiedenen IoT-Modulen	147
Abbildung 7-4: Messgelände für das Laborexperiment auf dem Gelände der TUM in Garching [Zei-2020b]	150
Abbildung 7-5: Visualisierung des Service aktuelle Positionen und Bestände	152
Abbildung 7-6: Paretodiagramm der GPS-Koordinatenabweichung vom Referenzpunkt bei einer Messdauer von 72 Stunden [Zei-2020b]	154
Abbildung 7-7: Visualisierung der Temperaturüberwachung: zeitlicher Temperaturverlauf für einen imSLT (oben) und Lagerbedingungen im Feldeinsatz (unten)	155

Abbildung 7-8: Auswertung der Versuche bzgl. des Temperatur-Monitorings bei unterschiedlichen Übertragungsintervallen des IoT-Moduls	156
Abbildung 7-9: Visualisierung der Erschütterungsüberwachung: Kartenansicht für die detaillierte Analyse (oben) und zeitlicher Verlauf der Erschütterungen für einen imSLT (unten)	158
Abbildung 7-10: Minütlicher Positionsverlauf eines imSLT (oben) und zeitlicher Verlauf der Bestände je Geofence auf Tagesbasis (unten)	160
Abbildung 7-11: Durch die Cloudplattform berechnete Standzeiten für den im Geofence abgestellten imSLT	162
Abbildung 7-12: App zur Aufnahme des Schadensberichts [in Anlehnung an Gra-2021]	165
Abbildung 7-13: Visualisierung der aufgenommenen Schadensberichte	165
Abbildung 7-14: Design und Aufbau der durchgeführten Umfrage [Zei-2020a]	177
Abbildung 7-15: Umfrageergebnisse zur Nutzenkategorie Verbesserung der Transparenz [in Anlehnung an fml-2020, S. 71]	178
Abbildung 7-16: Umfrageergebnisse zur Grenzwertüberwachung von Standzeit, Erschütterung und Temperatur [Zei-2020a]	180
Abbildung 7-17: Erhöhung der Planungssicherheit und des Kundenvertrauens durch den Service Auftragsverfolgung [Zei-2020a]	182
Abbildung 7-18: Umfrageergebnis zur Wartung des imSLT [in Anlehnung an fml-2020, S. 87]	184

Tabellenverzeichnis

Hauptteil

Tabelle 2-1:	Übersicht über Organisationen die LPWAN-Standards entwickeln [in Anlehnung an Raz-2017, S. 863].	32
Tabelle 3-1:	Qualitative Bewertung der präsentierten Forschungsarbeiten des Themenbereichs „modulare Sonderladungsträger“ hinsichtlich der eingeführten Kriterien	44
Tabelle 3-2:	Qualitative Bewertung der präsentierten Forschungsarbeiten des Themenbereichs „Referenzarchitekturen für das IoT“ hinsichtlich der eingeführten Kriterien	52
Tabelle 3-3:	Qualitative Bewertung der präsentierten Forschungsarbeiten des Themenbereichs „intelligente Behälter in der Logistik“ hinsichtlich der eingeführten Kriterien	60
Tabelle 4-1:	Qualitative Bewertung der adressierten Umfänge innerhalb der präsentierten Forschungsarbeiten in Bezug auf die eingeführten Bewertungskriterien	62
Tabelle 5-1:	Zusammenfassung der Herausforderungen und Schwachstellen, Aufgliederung in Wirkung und mögliche Ursachen	77
Tabelle 5-2:	Beschreibung der identifizierten Anforderungen an die Architektur des unternehmensübergreifenden Service-Systems	78
Tabelle 6-1:	Zuordnung der identifizierten Nutzenkategorien zu Nutzeneffekten [in Anlehnung an fml-2020, S. 56]	105
Tabelle 6-2:	Zuordnung der einzelnen Services zu den Nutzenkategorien anhand der Primär- und Sekundäreffekte	109
Tabelle 6-3:	Beispielhafte Zuordnung von Berechtigungen der Stufe 1-4 bzgl. der Datenklassen des Service-Systems	136
Tabelle 7-1:	Umsetzungsreihenfolge für die prototypische Implementierung der konzipierten Services [in Anlehnung an Gra-2021]	151
Tabelle 7-2:	Gemessene Stärke der Erschütterung in Abhängigkeit der Anbringungspunkte des IoT-Moduls	159
Tabelle 7-3:	Überprüfung und Diskussion der Anforderungserfüllung	167

Anhang A

Tabelle A-1:	Stark vereinfachter Vergleich gängiger Funktechnologien mit den Anforderungen der prototypischen Implementierung	A-2
--------------	--	-----

Anhang A Zusatzinformationen zur Evaluierung

In Anhang A werden zusätzliche Informationen zur Evaluierung der Fünf-Schichten-IoT-Architektur und der damit verbundenen Überprüfung der Services bereitgestellt.

A.1 Vergleich von Funktechnologien für den prototypischen Einsatz

Tabelle A-1 zeigt eine stark vereinfachte Darstellung des durchgeführten Vergleichs bzgl. der in Frage kommenden Funktechnologien für den prototypischen Aufbau.

Tabelle A-1: Stark vereinfachter Vergleich gängiger Funktechnologien mit den Anforderungen der prototypischen Implementierung

	Anforderungen an den Prototyp	Ultra Wide Band	LoRa	Narrowband IoT	SigFox	WiFi	RFID	Bluetooth-Low-Energy
Möglicher Einsatzbereich	Werk & Transportweg	Werk	Werk & Transportweg	Werk & Transportweg	Werk & Transportweg	Werk	Werk	Werk
Ortungsgenauigkeit	< 10 m Werk < 2 km Transportweg	< 50 cm	~ 50 m	~ 50 m	~ 50 m	< 5 m	< 3 m	< 8 m
Reichweite	mindestens 50 m	Ø 25 m max. 50 m	Ø 2 km max. 15 km	Ø 10 km max. 15 km	Ø 2 km max. 10 km	Ø 50 m max. 150 m	Ø 5 m max. 15 m	Ø 30 m max. 100 m
Datenrate	wenige Kbit/s	bis 460 Mbit/s	bis 50 Kbit/s	bis 250 Kbit/s	bis 100 Bit/s	bis 1,6 Gbit/s	wenige Bit/s	bis 2 Mbit/s
Energieeffizienz	hoch	mittel - niedrig	hoch	hoch	hoch	niedrig	hoch (passiv)	mittel
Kosten der Umsetzung	niedrig	sehr hoch	niedrig	hoch	mittel	niedrig	mittel	mittel
Netzaufbau	eigenes Netzwerk	eigenes Netzwerk	eigenes Netzwerk	Netzwerk-anbieter	Netzwerk-anbieter	eigenes Netzwerk	eigenes Netzwerk	eigenes Netzwerk
Literaturquelle	vgl. auch [Gra-2020]	[Zaf-2017]	[Lin-2019] [Zei-2019b]	[Lin-2019] [Sin-2017]	[Zaf-2017] [Lin-2019]	[VDE-2017] [Sau-2018]	[Bun-2005]	[Gup-2016] [Lee-2015] [Zaf-2017]

Konventioneller Ladungsträger

Die folgenden Fragen beziehen sich auf den Einsatz des konventionellen Sonderladungsträgers (SLT).

Ausgangssituation

1. Wie viele Minuten verbringt ein Ladungsträger mindestens in den folgenden Bereichen innerhalb eines geschlossenen Behälterkreislaufs?

2. Wie häufig fallen Ihnen durch den Transport bedingte Beschädigungen der Transportgüter auf?

- immer
- oft
- gelegentlich
- selten
- nie
- kann ich nicht beurteilen

Optionale Begründung: _____

3. Wie stark beeinflussen verschmutzte Ladungsträger Ihrer Meinung nach die Qualität der Transportgüter?

- sehr stark
- stark
- mittelmäßig
- wenig
- überhaupt nicht
- kann ich nicht beurteilen

Optionale Begründung: _____

4. Wie häufig entsteht Lieferverzug aufgrund von Bestandsproblemen?

- immer
- oft
- gelegentlich
- nie
- kann ich nicht beurteilen

Optionale Begründung: _____

5. Wie zufrieden sind Sie aktuell mit der durchschnittlichen Dauer von Reparaturen bei konventionellen Sonderladungsträgern?

- | | | | | | |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------------|
| <input type="checkbox"/> |
| sehr
unzufrieden | | | | sehr
zufrieden | kann ich nicht
beurteilen |

6. Können Sie sich aktuell darauf verlassen, dass die Buchungskonten korrekt sind?

- immer
- oft
- gelegentlich
- nie
- kann ich nicht beurteilen

Optionale Begründung: _____

7. Geben Sie dem konventionellen Sonderladungsträger für die folgenden Bereiche jeweils eine Schulnote.

	1	2	3	4	5	6	Kann ich nicht beurteilen
Entwicklung und Herstellung							
Physischer Behältereinsatz							
Behältermanagement							

Modularer, intelligenter Sonderladungsträger

Die folgenden Fragen beziehen sich auf den modularen, intelligenten Sonderladungsträger (imSLT).

Kategorie 1: Höhere Kundenzufriedenheit

1. Könnte Ihrer Meinung nach das zukünftig geplante Auftragstracking bei der Behälterherstellung und die damit zur Verfügung gestellten Daten Planungssicherheit für den Kunden schaffen?

- ganz sicher
- ziemlich wahrscheinlich
- vielleicht
- wahrscheinlich nicht
- keinesfalls

Optionale Begründung: _____

2. Könnte Ihrer Meinung nach das zukünftig geplante Auftragstracking bei der Behälterherstellung und die damit zur Verfügung gestellten Daten das Vertrauen des Kunden erhöhen?

- ganz sicher
- ziemlich wahrscheinlich
- vielleicht
- wahrscheinlich nicht
- keinesfalls

Optionale Begründung: _____

3. Das geplante Auftragstracking bei der Behälterherstellung soll in Zukunft auch Verzögerungsmeldungen während der Behälterherstellung an den Kunden senden. Sehen Sie eine Verzögerungsmeldung als Risiko an, dass der Kunde eine negative Einstellung zum Hersteller bekommt?

- ja
- nein

Optionale Begründung: _____

4. Zukünftig wird der Kunde die gewünschten imSLTs über den Produktkonfigurator bestellen. Denken Sie, dass der Bestellvorgang für den Kunden dadurch vereinfacht wird?

- ganz sicher
- ziemlich wahrscheinlich
- vielleicht
- wahrscheinlich nicht
- keinesfalls
- kann ich nicht beurteilen

Optionale Begründung: _____

Kategorie 2: Transparenzsteigerung der Logistikprozesse

1. Wie groß sehen Sie den Nutzen zu wissen in welchem Teil des Werkes (z.B. Wareneingang, Montage) sich der imSLT gerade befindet?

- sehr groß
- groß
- mittelmäßig
- niedrig
- sehr niedrig
- kann ich nicht beurteilen

Erforderliche Begründung: _____

2. Wie groß sehen Sie den Nutzen zu wissen welche Temperatur im imSLT herrscht?

- sehr groß
- groß
- mittelmäßig
- niedrig
- sehr niedrig
- kann ich nicht beurteilen

Erforderliche Begründung: _____

3. Wie groß sehen Sie den Nutzen, den Grad der Erschütterung des imSLT überwachen zu können?

- sehr groß
- groß
- mittelmäßig
- niedrig
- sehr niedrig
- kann ich nicht beurteilen

Erforderliche Begründung: _____

4. Eine automatische Benachrichtigung bei Überschreitung eines eingestellten Grenzwertes finde ich sinnvoll bei:

- Temperatur
- Erschütterung
- Standort

Erforderliche Begründung: _____

Kategorie 3: Verbesserung der Lieferzeiten und der Produktqualität

1. Denken Sie, dass eine reaktive Reinigung (nach Eintritt der Verschmutzung vom Kunden gebucht) und/oder eine proaktive Reinigung (präventiv in regelmäßigen Zeitabständen) des imSLT die Transportbedingungen verbessern könnte und somit merkliche Auswirkungen auf den Zustand des Transportguts haben würde?

- Ja, eine reaktive Reinigung allein finde ich sinnvoll.
- Ja, eine proaktive Reinigung allein finde ich sinnvoll.
- Ja, eine proaktive und reaktive Reinigung in Kombination finde ich sinnvoll.
- Nein, eine (regelmäßige) Reinigung verursacht unnötige Kosten.
- Nein, ein gereinigter imSLT hat keine merklichen Auswirkungen auf den Zustand des Transportguts.
- Sonstiges: _____

2. Welche Maßnahme(n) würden Sie ergreifen, wenn Sie anhand der Zustandsüberwachung bemerken sollten, dass die gemessene Temperatur im imSLT einen gewählten Grenzwert überschreitet?

- bei erhöhten Temperaturen Lieferanten kontaktieren
- Transport anhalten und Transportgut prüfen
- auf nachträgliche Ursachenanalysen warten
- Ware direkt nachbestellen
- Sonstiges: _____

3. Welche Maßnahme(n) würden Sie ergreifen, wenn Sie anhand der Zustandsüberwachung bemerken sollten, dass die gemessenen Erschütterungen des imSLT einen gewählten Grenzwert überschreiten?

- bei erhöhten Erschütterungen den Lieferanten kontaktieren und auf Fahrstil aufmerksam machen
- Transport anhalten und Transportgut prüfen
- auf nachträgliche Ursachenanalysen warten
- Ware direkt nachbestellen
- Sonstiges: _____

4. Durch die Dienstleistungen Tracking&Tracing und Zustandsüberwachung können Outdoorlagerungen entdeckt werden. Wie hilfreich finden Sie diese Funktion?

- äußerst hilfreich
- sehr hilfreich
- etwas hilfreich
- nur bedingt hilfreich
- überhaupt nicht hilfreich
- kann ich nicht beurteilen

Optionale Begründung: _____

Kategorie 4: Vereinfachung und Fehlerreduktion durch Erhöhung des Automatisierungs- und Standardisierungsgrades

1. Kann Ihrer Meinung nach die Dienstleistung Tracking den manuellen Inventuraufwand ersetzen?

- ganz sicher
- ziemlich wahrscheinlich
- vielleicht
- wahrscheinlich nicht
- keinesfalls
- kann ich nicht beurteilen

Optionale Begründung: _____

2. Ich freue mich über ein Assistenzsystem, das Zustände der imSLTs überwacht und mir dadurch dabei hilft Fehler zu vermeiden.

- | | | | | |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|
| <input type="checkbox"/> |
| stimme gar
nicht zu | | | | stimme voll und
ganz zu |

Erforderliche Begründung: _____

3. Ich freue mich über ein Assistenzsystem, das Standorte der imSLTs überwacht und mir dadurch dabei hilft Fehler zu vermeiden.

- | | | | | |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|
| <input type="checkbox"/> |
| stimme gar
nicht zu | | | | stimme voll und
ganz zu |

Erforderliche Begründung: _____

4. Denken Sie, dass bei der Verwendung von standardisierten Modulen für einen SLT weniger Konstruktionsmängel entstehen?

- ganz sicher
- ziemlich wahrscheinlich
- vielleicht
- wahrscheinlich nicht
- keinesfalls

Optionale Begründung: _____

Kategorie 5: Langfristige Reduktion der Schäden und des Reparaturaufwands

1. Wie stark wird die Tätigkeit des Reparateurs durch einen Schadensreport vereinfacht?

- sehr stark
- stark
- mittelmäßig
- wenig
- überhaupt nicht
- kann ich nicht beurteilen

Optionale Begründung: _____

2. Wie groß schätzen Sie den Nutzen eines Fotos des Schadens im Schadensreport ein?

- sehr groß
- groß
- mittelmäßig
- niedrig
- sehr niedrig
- kann ich nicht beurteilen

Optionale Begründung: _____

3. Welche häufig auftretenden Schäden können Ihrer Meinung nach durch das Tracking & Tracing und die Zustandsüberwachung der imSLTs reduziert oder sogar ganz vermieden werden?
Begründen Sie bitte Ihre Antwort.
-

Kategorie 6: Nachweisbare Verantwortungsverteilung

1. Ist es Ihrer Meinung nach hilfreich, das verursachende Unternehmen bei Schäden oder Zwischenfällen zu bestimmen?

- ja
 nein

Erforderliche Begründung: _____

2. Ich finde es gut, wenn es ein Assistenzsystem gibt, welches Zustände der imSLTs überwacht und somit dabei hilft das verursachende Unternehmen bei auftretenden Schäden zu bestimmen.

-
- stimme gar nicht zu stimme voll und ganz zu

3. Ich finde es gut, wenn es ein Assistenzsystem gibt, welches Standorte der imSLTs verfolgbar macht und somit dabei hilft das verursachende Unternehmen bei auftretenden Schäden zu bestimmen.

-
- stimme gar nicht zu stimme voll und ganz zu

4. Verändert sich Ihre Arbeitsweise durch die Einführung des Assistenzsystems, welches Zustände überwacht und Standorte verfolgbar macht?

- ja
 nein

Erforderliche Begründung: _____

Kategorie 7: Verbesserung der Nachhaltigkeit

1. Hätten Sie Interesse an einem Bericht, der Informationen über die CO₂-Bilanz der wiederverwendbaren und recyclebare Module gibt?

ja

nein

2. Den Bericht würde ich verwenden für:

3. Denken Sie, dass die Lebensdauer des imSLT durch eine regelmäßige Wartung verlängert wird?

ja, verlängert nachweisbar die Lebensdauer

ja, verlängert wahrscheinlich die Lebensdauer

nein, technisch nicht sinnvoll

nein, verursacht nur unnötige Kosten

Sonstiges: _____

Optionale Begründung: _____

Abschließende Bewertung

1. Geben Sie dem modularen, intelligenten Sonderladungsträger (imSLT) für die folgenden Bereiche jeweils eine Schulnote.

	1	2	3	4	5	6	Kann ich nicht beurteilen
Entwicklung und Herstellung							
Physischer Behältereinsatz							
Behältermanagement							

2. Nach der teilweisen Umsetzung einiger Dienstleistungen und dem Aufzeigen der technischen Möglichkeiten im Projekt, bitte ich Sie nun den Nutzen der einzelnen Konzepte der Dienstleistungen anhand der folgenden Punkteskala einzuschätzen.

1 = kein Nutzen; 5 = sehr großer Nutzen

Ebenso bitte ich Sie zu bewerten, für wie wahrscheinlich Sie die tatsächliche Verwendung der Dienstleistungen sehen, falls sie produktiv umgesetzt werden würden.

1 = keinesfalls wahrscheinlich; 5 = sehr wahrscheinlich

	Bewertung des Nutzens						Wahrscheinlichkeit der tatsächlichen Verwendung				
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
Auftragstracking bei der Behälterherstellung											
Automatisierte Buchungen für WE/WA											
Modularität des imSLT (Rekonfigurationsmöglichkeiten, Ersatzteile, Wiederverwendung)											
Reparaturbericht											
Schadensreport											
Tracing von imSLTs (historische Positionsdaten)											
Tracking von imSLTs (aktuelle Positionsdaten)											
Regelmäßige Wartung											
Zustandsüberwachung (Monitoring von Temperatur & Erschütterung)											
Produktkonfigurator											

System Usability Scale

Abschließend bitte ich Sie durch das Beantworten der folgenden 10 Fragen die T-Matix Plattform bzw. die entstandene Umsetzung der Dienstleistungen zu bewerten. Hier ist es wichtig, dass Sie spontan antworten und bei jeder Frage ein Kreuz setzen.

System = T-Matix Plattform mit den umgesetzten Dienstleistungsumfängen

	Stimme gar nicht zu				Stimme voll und ganz zu
Ich kann mir sehr gut vorstellen, das System regelmäßig zu nutzen.					
Ich empfinde das System als unnötig komplex.					
Ich empfinde das System als einfach zu nutzen.					
Ich denke, dass ich technischen Support brauchen würde, um das System zu nutzen.					
Ich finde, dass die verschiedenen Funktionen des Systems gut integriert sind.					
Ich finde, dass es im System zu viele Inkonsistenzen gibt.					
Ich kann mir vorstellen, dass die meisten Leute das System schnell zu beherrschen lernen.					
Ich empfinde die Bedienung als sehr umständlich.					
Ich habe mich bei der Nutzung des Systems sehr sicher gefühlt.					
Ich musste eine Menge Dinge lernen, bevor ich mit dem System arbeiten konnte.					