

Ein Beitrag zur Entwicklung von Baustellenversorgungssystemen

**vom Fachbereich
Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
der Technischen Universität Darmstadt**

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte

**Dissertation
von Dipl.-Ing. Jonas Kleiner**

Erstgutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko

Zweitgutachter: Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Christian Hofstadler

Darmstadt 2023

Kleiner, Jonas:

Ein Beitrag zur Entwicklung von Baustellenversorgungssystemen

Darmstadt, Technische Universität Darmstadt

Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUprints: 2023

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-243436

Tag der mündlichen Prüfung: 17. Juli 2023

Veröffentlicht unter CC BY-SA 4.0 International

<https://creativecommons.org/licenses/>

Erstreferent:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko

Institut für Baubetrieb

Technische Universität Darmstadt

Korreferent:

Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Christian Hofstadler

Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft

Technische Universität Graz

Vorwort des Erstreferenten

Die Planung und die Realisierung von Bauprojekten ist mit den Transfers von großen Mengen an Daten, Informationen, Betriebsmitteln, Baustoffen und weiteren projektnotwendigen Größen verbunden. Es ist erforderlich, entsprechende Steuerungs- und Regelungssysteme für diese Transfers zu organisieren, damit die dazugehörigen Prozesse effektiv, effizient und ökologisch verträglich ablaufen. Sie können unter dem bisher normativ nicht geregelten Begriff Baulogistik zusammengefasst werden. Die zwischenzeitlich verstärkte digitale Transformation in der Bauwirtschaft sowie die gereifte Erkenntnis, dass die Baulogistik einen der grundlegenden Erfolgsfaktoren für eine sach- und fachgerechte Planung und Realisierung von Bauprojekten darstellt, bilden die Impulse und die Motivation für die Forschungsarbeit von Herrn Dipl.-Ing. Jonas Kleiner, deren Ergebnisse mit der vorliegenden Dissertationsschrift *Ein Beitrag zur Entwicklung von Baustellenversorgungssystemen* dokumentiert sind.

Die Forschungsarbeit von Herrn Kleiner wird entlang der drei Forschungsfragen geführt:

- Welche Schwachstellen sind gegenwärtig in der Planung, Organisation und Realisierung der Baulogistik vorhanden?
- Welche Methoden führen zu einer Verbesserung dieser Schwachstellen?
- Welche technologischen Mittel der Digitalisierung können die Baulogistik unterstützen?

Im Ergebnis wird von Herrn Kleiner das Konzept eines auf digitalen Komponenten basierten Baustellenversorgungssystem aufgestellt. Das Element des Warenverteilzentrums im Logistiknetzwerk einer Baustelle sowie die Echtzeitfunktionalität bilden die besonderen Merkmale dieses Systems. Der Systemaufbau (Datenerfassung, Datenübertragung, Datenstrukturierung sowie Datenaufbereitung und Datenauswertung) und der Systemablauf werden beschrieben. Die Viabilität des entwickelten Baustellenversorgungssystem wird mithilfe von Anwendungsfällen in Labor- und Baustellenumgebungen nachgewiesen. Abschließend wird das entwickelte Baustellenversorgungssystem in das bestehende, am Institut für Baubetrieb der TU Darmstadt entwickelte, Baulogistikprozessmodell integriert. Das Baulogistikprozessmodell wird dadurch präzisiert und erweitert.

Die von Herrn Dipl.-Ing. Jonas Kleiner vorgelegte Dissertation bildet einen sehr interessanten und wertvollen Beitrag im Forschungskomplex der Bauprozesssteuerung im Kontext der Baulogistik sowie der digitalen Transformation im Baubetrieb. Herr Kleiner entwickelt ein reales Baustellenversorgungssystem, fusioniert darin Daten aus polysensoralen Systemen und generiert Informationen, welche eine Echtzeitsteuerung- und -regelung von Versorgungsprozessen von Baustellen ermöglichen. Gleichzeitig wird eine Verknüpfung zu den digitalen Arbeitsmethoden wie Building Information Modeling realisiert. Durch die Integration des Baustellenversorgungssystem in das bestehende Baulogistikprozessmodell wird eine neue Basis

für eine strukturierte Bauleistungsplanung und Bauleistungsrealisierung geschaffen. Zu berücksichtigen ist, dass die Forschungsarbeit von Herrn Kleiner über längere Zeiträume durch die Pandemie-Bedingungen beeinträchtigt war. Trotzdem ist es ihm gelungen, ein sehr gutes Forschungsergebnis zu generieren. Für diese Leistung danke ich Herrn Kleiner herzlich.

Darmstadt, im Juli 2023

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko

Danksagung des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Baubetrieb der Technischen Universität Darmstadt. Für die Unterstützung bei der Erstellung der Arbeit möchte ich mich bei allen Beteiligten ganz herzlich bedanken.

Mein außerordentlicher Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko, der mich im Rahmen meiner Dissertation und meiner Arbeit am Institut für Baubetrieb stets unterstützt und gefördert hat. Ebenso danke ich Herrn Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Christian Hofstadler für die Übernahme des Korreferats und die stets konstruktive Zusammenarbeit.

Mein Dank gilt auch allen Studierenden, die mit ihren Master- und Bachelorthesen einen wesentlichen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet haben. Gleichmaßen danke ich den zahlreichen Personen aus der Bauwirtschaft, die mir Untersuchungen auf der Baustelle ermöglicht haben oder für Interviews zur Verfügung standen. Der COUNT+CARE GmbH & Co. KG danke ich für die Unterstützung bei der prototypischen Umsetzung.

Bei meinen Kolleginnen und Kollegen am Institut für Baubetrieb möchte ich mich für die angenehme und konstruktive Zusammenarbeit bedanken. Insbesondere danke ich Herrn Dr.-Ing. Jörg Fenner für die wertvollen Diskussionen und Anregungen zu meiner Arbeit. Ebenso ein besonderer Dank gilt Frau Dr.-Ing. Pia Weil für das angenehme gemeinsame Wirken bei den betreuten Lehrveranstaltungen und Forschungsprojekten sowie den fachlichen Austausch. Herrn Justus Zellner M. Sc. danke ich für das angenehme gemeinsame Wirken bei den betreuten Lehrveranstaltungen.

Meinen Freundinnen und Freunden danke ich insbesondere dafür, dass sie während der Erstellung dieser Arbeit für die notwendigen Ablenkungen gesorgt haben.

Mein größter Dank gilt meinen Eltern und meinem Bruder für die vielfältige und bedingungslose Unterstützung auf meinem bisherigen Lebensweg. Ohne Euch wäre das alles nicht möglich gewesen.

Darmstadt, im Juli 2023

Jonas Kleiner

Inhaltsverzeichnis

Vorwort des Erstreferenten	I
Danksagung des Verfassers	III
Inhaltsverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	XI
Abkürzungsverzeichnis	XII
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung der Arbeit	3
1.2 Abgrenzung und Ziele der Arbeit.....	7
1.3 Forschungsmethodik der Arbeit.....	10
1.4 Aufbau der Arbeit.....	13
2 Grundlagen	17
2.1 Logistik.....	18
2.1.1 Begriffsdefinitionen und Entwicklungen der Logistik	18
2.1.2 Organisations- und Koordinationsformen der Logistik	25
2.1.3 Logistikketten	30
2.2 Baulogistik	33
2.2.1 Begriffsdefinitionen und Entwicklungen der Baulogistik.....	33
2.2.2 Organisations- und Koordinationsformen der Baulogistik.....	43
2.2.3 Stand der Forschung zur Baulogistik	48
2.2.4 Baulogistikprozessmodell.....	52
2.2.4.1 Baulogistikinitiierung – Baulogistikbericht	56
2.2.4.2 Baulogistikplanung – Baulogistikkonzept	56
2.2.4.3 Baulogistikorganisation – Baulogistikhandbuch	58
2.2.4.4 Baulogistikattribute – Bewertung der baulogistischen Komplexität	59
2.3 Lean Logistics.....	66
2.3.1 Begriffsdefinitionen und Entwicklungen der Lean-Ansätze	66
2.3.2 Ansätze und Auswirkungen einer Lean Logistics innerhalb der Logistik.....	69
2.3.3 Ansätze und Auswirkungen einer Lean Logistics innerhalb der Baulogistik.....	72
2.4 Digitalisierung	77
2.4.1 Begriffsdefinitionen und Entwicklungen der Digitalisierung	77
2.4.2 Ausgewählte Auswirkungen der Digitalisierung auf die Logistik.....	80

2.4.3	Ausgewählte Auswirkungen der Digitalisierung auf den Baubetrieb	83
3	Basiselemente der Systembildung	89
3.1	Supply-Chain-Management	90
3.1.1	Supply-Chain-Management in der Logistikbranche	90
3.1.2	Supply-Chain-Management in der Bauindustrie	96
3.2	Warenverteilzentren	101
3.2.1	Warenverteilzentren in der Logistikbranche	101
3.2.2	Warenverteilzentren in der Bauindustrie	105
3.3	Sensorik	114
3.3.1	Ausgewählte Grundlagen zur Sensorik im Allgemeinen	114
3.3.2	Ausgewählte Anwendungsbeispiele zur Sensorik im Baubetrieb	117
4	Systementwicklung und Systemevaluation.....	121
4.1	Situations- und Anforderungsanalyse	122
4.1.1	Bestellprozess	122
4.1.2	Avisierungsprozess.....	126
4.1.3	Anlieferungsprozess	133
4.1.4	Lagerungsprozess.....	135
4.1.5	Anforderungsanalyse	139
4.2	Baustellenversorgungssystem	142
4.2.1	Systembeschreibung	142
4.2.2	Systemanforderungen.....	146
4.2.2.1	Funktionale Systemanforderungen.....	146
4.2.2.2	Technische Systemanforderungen.....	148
4.2.3	Systemaufbau	151
4.2.3.1	Datenerfassung	151
4.2.3.2	Datenübertragung	152
4.2.3.3	Datenstrukturierung.....	152
4.2.3.4	Datenaufbereitung und Datenauswertung.....	153
4.2.4	Systemablauf	154
4.2.5	Systemanwendung.....	157
4.2.5.1	Anwendungsfall „Intelligente Palette“	157
4.2.5.2	Anwendungsfall „Intelligentes Bauteil“	165
4.2.5.3	Anwendungsfall „Intelligenter Materialfluss“	171

5	Systemintegration	197
5.1	Baustellenversorgungssystem – Initiierung.....	202
5.2	Baustellenversorgungssystem – Planung.....	210
5.3	Baustellenversorgungssystem – Organisation	219
5.4	Baustellenversorgungssystem – Realisierung	227
6	Schlussbetrachtung	235
6.1	Zusammenfassung.....	236
6.2	Fazit	239
6.3	Ausblick.....	245
	Literaturverzeichnis	247

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ablauf des Forschungsprozesses	12
Abbildung 2: Aufbau der Arbeit.....	13
Abbildung 3: Entwicklungsstufen der Logistik.....	20
Abbildung 4: Institutionelle Abgrenzung von Logistiksystemen.....	22
Abbildung 5: Funktionelle Abgrenzung von Logistiksystemen	23
Abbildung 6: Eingliederung der Logistik in die Organisationsstruktur eines Unternehmens	26
Abbildung 7: Eingliederung der Logistik in eine Matrixorganisation eines Unternehmens..	27
Abbildung 8: Grundstrukturen von Logistiksystemen	30
Abbildung 9: Exemplarische Logistikkette	32
Abbildung 10: Phasenspezifische Subsysteme der Baulogistik – Grundriss	36
Abbildung 11: Phasenspezifische Subsysteme der Baulogistik – Schnitt	36
Abbildung 12: Gegenüberstellung der Entwicklungsstufen der Logistik und der Baulogistik	41
Abbildung 13: Prozesskonzept der Baulogistik	53
Abbildung 14: Baulogistikprozessmodell.....	55
Abbildung 15: Ineinandergreifen der Planungsprozesse von Objekt- und Baulogistikplanung	57
Abbildung 16: Entscheidungsnetz der Baulogistikkomplexität.....	60
Abbildung 17: Organisationsformen der baulogistischen Leistungen.....	64
Abbildung 18: Kunden-, Waren- und Servicewert im Kontext der Lean Logistics.....	70
Abbildung 19: Sichtweisen zur Abgrenzung zwischen Supply-Chain-Management und Logistik	91
Abbildung 20: Ansätze des Supply-Chain-Managements	92
Abbildung 21: Innerbetriebliches Order-to-Payment-S	93
Abbildung 22: Aneinanderreihung einzelner innerbetrieblicher Order-to-Payment-S	94
Abbildung 23: Exemplarisches Logistiknetzwerk einer Baustelle	96
Abbildung 24: Vertikaler und horizontaler Bruch der Wertschöpfungskette einer Baustelle	97
Abbildung 25: Projekt-Supply-Chain eines Bauprojekts	99
Abbildung 26: Konzepte der Beschaffungs- und Distributionslogistik	102
Abbildung 27: Gegenüberstellung der Versorgung einer Baustelle mit und ohne Warenverteilzentrum	105

Abbildung 28: Interaktion von Sensoren und Aktoren mit der physischen Welt	114
Abbildung 29: Prozentuale Verteilung der Tätigkeiten in der Disposition eines Bauhofs ..	123
Abbildung 30: Häufigkeiten der einzelnen Bestellmöglichkeiten aus Sicht des Baustoffhandels.....	124
Abbildung 31: Prozentualer Anteil der verfrühten und verspäteten Anlieferungen.....	128
Abbildung 32: Durchschnittliche Abweichungen der verfrühten und verspäteten Anlieferungen.....	128
Abbildung 33: Prozentualer Anteil der verfrühten und verspäteten Abfahrten	129
Abbildung 34: Durchschnittliche Abweichungen der verfrühten und verspäteten Abfahrten	129
Abbildung 35: Prozentualer Anteil der zu kurz und zu lang avisierten Aufenthaltsdauern	130
Abbildung 36: Durchschnittliche Abweichungen der zu kurz und zu lang avisierten Aufenthaltsdauern.....	130
Abbildung 37: Überlastung der Baustellenzufahrten und Auswirkungen auf die Projektraumumgebung.....	132
Abbildung 38: Logistiknetzwerk einer Baustelle mit Warenverteilzentrum.....	143
Abbildung 39: Prozesskette I – Sensorisch zu erfassende Ereignisse	146
Abbildung 40: Prozesskette II – Sensorisch zu erfassende Ereignisse	147
Abbildung 41: Systemaufbau des IoT-Funksystems	151
Abbildung 42: Systemablauf des IoT-Funksystems	154
Abbildung 43: Systemaufbau des IoT-Funksystems – Anwendungsfall „Intelligente Palette“	158
Abbildung 44: „Intelligente Palette“ (links) und Gewichtssensor im Detail (rechts)	158
Abbildung 45: Sensoren „Intelligente Palette“ – Gewichtssensor (links) und Beacons (rechts)	159
Abbildung 46: Unterseite „Intelligente Palette“	159
Abbildung 47: Anordnung der Beacons – Institut für Baubetrieb (oben) und Kooperationspartner (unten).....	160
Abbildung 48: Standort der Gateways – Institut für Baubetrieb (links und mittig) und Kooperationspartner (rechts)	161
Abbildung 49: Dashboard „Intelligente Palette“.....	161
Abbildung 50: Prozesskette „Intelligente Palette“	162
Abbildung 51: Be- und Entladeprozesse „Intelligente Palette“	163
Abbildung 52: Raumweise Positionsbestimmung „Intelligente Palette“	164
Abbildung 53: Sensoren „Intelligentes Bauteil“	166

Abbildung 54: Befestigung der Beacons – Bewehrungskorb (links) und Primärstütze (rechts)	166
Abbildung 55: Mobile Bridge (links) und Gateway Baustelle (rechts)	167
Abbildung 56: Informationsdarstellung „Intelligentes Bauteil“	168
Abbildung 57: Visualisierung Prozessstatus „Intelligentes Bauteil“ – Beacon c32a11f8a9e3 (links) und Beacon f32382d0d0f9 (rechts)	170
Abbildung 58: Sensoren „Intelligenter Materialfluss“ – BLE-Beacons.....	173
Abbildung 59: Sensoren „Intelligenter Materialfluss“ – Neigungssensor mit integriertem Mikrocontroller	174
Abbildung 60: Sensoren „Intelligenter Materialfluss“ – GPS-Sensor	174
Abbildung 61: Informationsdarstellung I „Intelligenter Materialfluss“ – BLE-Beacons und Neigungssensoren	175
Abbildung 62: Informationsdarstellung II „Intelligenter Materialfluss“ – BLE-Beacons und Neigungssensoren	175
Abbildung 63: Informationsdarstellung „Intelligenter Materialfluss“ – GPS-Sensor – Kartenansicht (links), Listenansicht (mittig) und Zonendefinition (rechts)	177
Abbildung 64: Komplexes Ereignis „Baustellenversorgung über ein Warenverteilzentrum“	178
Abbildung 65: Komplexes Ereignis „Baustellenversorgung von Stahlbetonfertigteilstützen“	179
Abbildung 66: Dashboard „Baustellenversorgung über ein Warenverteilzentrum“ – Übersicht.....	183
Abbildung 67: Dashboard „Baustellenversorgung über ein Warenverteilzentrum“ – Standort	183
Abbildung 68: Dashboard „Baustellenversorgung über ein Warenverteilzentrum“ – Details	184
Abbildung 69: Dashboard „Baustellenversorgung über ein Warenverteilzentrum“ – Gegenüberstellung Ist- und Plan-Materialfluss	185
Abbildung 70: Dashboard „Baustellenversorgung über ein Warenverteilzentrum“ – Analyse	186
Abbildung 71: Dashboard „Baustellenversorgung von Stahlbetonfertigteilstützen“ – Normative Managementebene.....	187
Abbildung 72: Dashboard „Baustellenversorgung von Stahlbetonfertigteilstützen“ – Strategische Managementebene	188
Abbildung 73: Dashboard „Baustellenversorgung von Stahlbetonfertigteilstützen“ – Operative Managementebene.....	188

Abbildung 74: Dashboard „Baustellenversorgung von Stahlbetonfertigteilstützen“ – Operative Managementebene – Details I	189
Abbildung 75: Dashboard „Baustellenversorgung von Stahlbetonfertigteilstützen“ – Operative Managementebene – Details II	189
Abbildung 76: Bauwerksmodell – Plug-in „Palettenverwaltung“	191
Abbildung 77: Bauwerksmodell – Plug-in „Bestellung“	192
Abbildung 78: Ausgangssituation der Systemintegration	197
Abbildung 79: Baustellenversorgungssystem – Initiierung	208
Abbildung 80: Baulogistische Lösungsvarianten	212
Abbildung 81: Baustellenversorgungssystem – Planung	218
Abbildung 82: Baustellenversorgungssystem – Organisation	225
Abbildung 83: Baustellenversorgungssystem – Realisierung	227
Abbildung 84: Baulogistikprozessmodell – Baustellenversorgungssystem	230
Abbildung 85: Prozesskonzept der Baulogistik – Baustellenversorgungssystem	233

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Avisierungs- und Erscheinungsquote.....	127
Tabelle 2: Analyse zu den Abweichungen zwischen der avisierten und tatsächlichen Ankunftszeit	128
Tabelle 3: Analyse zu den Abweichungen zwischen der avisierten und tatsächlichen Abfahrtszeit	129
Tabelle 4: Analyse zu den Abweichungen zwischen der avisierten und tatsächlichen Aufenthaltsdauer	130
Tabelle 5: Analyse des Lagerungsprozesses	136
Tabelle 6: Funktionale Anforderungen an die Sensoren – Prozesskette I.....	147
Tabelle 7: Funktionale Anforderungen an die Sensoren – Prozesskette II.....	148
Tabelle 8: Ergebnisse Baustellenstudie „Intelligentes Bauteil“.....	169
Tabelle 9: Komplexes Ereignis „Baustellenversorgung über ein Warenverteilzentrum“.....	178
Tabelle 10: Komplexes Ereignis „Baustellenversorgung von Stahlbetonfertigteilstützen“ .	179
Tabelle 11: Exemplarische Materialeignungsanalyse	215

Abkürzungsverzeichnis

AHO	Ausschuss der Verbände und Kammern der Ingenieure und Architekten für die Honorarordnung
AoA	Angle of Arrival
BIM	Building Information Model, Building Information Modeling
BLE	Bluetooth Low Energy
bspw.	beispielsweise
DGUV	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung
DIN	Deutsches Institut für Normung
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
EN	Europäische Norm
et al.	et alii (und andere)
f.	folgende (Seite)
ff.	fortfolgende (Seiten)
HOAI	Honorarordnung für Architekten und Ingenieure
ggf.	gegebenenfalls
GLCI	German Lean Construction Institute
GPS	Global Positioning System
IoT	Internet of Things
IT	Informationstechnologie
JIT	Just in Time
JIS	Just in Sequence
LoRa	Long Range
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
m	Meter
o. g.	oben genannt
REFA	Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation
RFID	Radio Frequency Identification
RSSI	Received Signal Strength Indicator
s.	siehe
S.	Seite
TFV	Transformation, Flow, Value
TPS	Toyota-Produktionssystem

TU	Technische Universität
TUL	Transport, Umschlag, Lagerung
u. a.	unter anderem
UWB	Ultra-wideband
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
vgl.	vergleiche
WLAN	Wireless Local Area Network

1 Einleitung

Die Phasen der Planung und Realisierung von Bauprojekten sind durch den Transfer von großen Mengen an Daten, Informationen, Baustoffen, Personen, Betriebs- und Finanzmitteln sowie weiteren projektnotwendigen Größen geprägt. Diese Transfers sind für eine erfolgreiche Projektabwicklung effizient und sicher durchzuführen und erfordern die Aktivierung der Baulogistik.¹ Hierbei stehen die Bauprojekte in ständigen Wechselwirkungen mit der Projektraumumgebung. Zum einen sind unmittelbare Auswirkungen, die aus dem originären Bauproduktionsprozess resultieren, zu konstatieren. Zum anderen sind durch Ver- und Entsorgungsprozesse der Baustelle Verkehrsbeeinträchtigungen und Verkehrsbehinderungen in der Projektraumumgebung festzustellen.²

Die Leistung respektive die Gesamtproduktivität auf der Baustelle beeinflussen maßgeblich die Transportanzahl zur Baustelle und somit die o. g. Verkehrsbeeinträchtigungen und Verkehrsbehinderungen.³ Dabei hat die Kombination und die Wahl der Produktionsfaktoren der Bauunternehmung und damit verbunden die vorgelagerte Planung der Produktions- und Logistikprozesse einen direkten Einfluss auf die Gesamtproduktivität der Baustelle, die sich aus der Zusammensetzung der Arbeits-, Betriebsmittel- und Stoffproduktivität ergibt.^{4, 5} Hierbei sind neben der Versorgungslogistik, die die o. g. Transferprozesse zur Baustelle beinhaltet, auch die Produktionslogistik, die die logistischen Prozesse innerhalb des Projektraums beschreibt, sowie die Entsorgungslogistik und die Informationslogistik von Relevanz.

Diese Umstände begründen das Postulat des Instituts für Baubetrieb der TU Darmstadt, bereits in frühen Planungsphasen eine Fachplanung Baulogistik zu initiieren und sind die Grundlage für das am Institut für Baubetrieb der TU Darmstadt entwickelte Prozessmodell der Baulogistikplanung⁶.

Geleitet und geprägt wird die vorliegende Arbeit durch die Prämisse des Prozessdenkens. Dieses Prozessdenken, verbunden mit prozessorientierten Ansätzen, überführen die durch die arbeitsteiligen Abläufe bei Planungs-, Beratungs-, Baudienst- und Bauleistungen entstehenden komplexen Strukturen in definierte Input-Output-Beziehungen und würdigen die Prozesse und Prozessketten adäquat. Der Prozess, ausgelöst durch ein Initialereignis, wandelt

¹ Vgl. Motzko (2020): Baulogistik, S. 593

² Vgl. Motzko et al. (2019): Zur Relevanz der Baulogistikplanung, S. 80

³ Vgl. Hofstadler (2007): Bauablaufplanung und Logistik im Baubetrieb, S. 102

⁴ Vgl. Hofstadler (2007): Bauablaufplanung und Logistik im Baubetrieb, S. 14

⁵ Vgl. Hofstadler (2007): Bauablaufplanung und Logistik im Baubetrieb, S. 21

⁶ Vgl. Ruhl et al. (2018): Baulogistikplanung

eine definierte Input-Struktur durch Einzeltätigkeiten, Tätigkeitsfolgen oder andere Transformationsvorgänge in eine definierte Output-Struktur um.⁷

Durch die Forschungsaktivitäten des Instituts für Baubetrieb der TU Darmstadt wird das Prozessdenken im Bauwesen fokussiert sowie maßgeblich geprägt und weiterentwickelt. Die Forschungsergebnisse von BINDER⁸, GOLDENBERG⁹, GRIEBEL¹⁰, HEIM¹¹, KAISER¹², KOSEL¹³, MEHR¹⁴, PFLUG¹⁵, RUHL¹⁶ und WEIL¹⁷ verdeutlichen die Relevanz des Prozessdenkens im Bauwesen und stellen wesentliche Beiträge zur Unterstützung der baubetrieblichen Prozesssteuerung dar. Die vorliegende Arbeit dient als weiterer Beitrag im Forschungskomplex der Echtzeit-Prozesssteuerung im Bauwesen und hierbei im Speziellen im Kontext der Baulogistik.

Die nachfolgenden einleitenden Kapitel erörtern die Ausgangssituation und Problemstellung der Arbeit, erläutern die Zielsetzung der Arbeit und grenzen diese thematisch ein. Außerdem wird das wissenschaftliche Vorgehen durch die Forschungsmethodik und den Aufbau der Arbeit dargelegt.

⁷ Vgl. Motzko et al. (2013): Grundlagen des Bauprozessmanagements, S. 3 ff.

⁸ Binder (2014): Ereignisbasierte Steuerung baulogistischer Prozesse mit Echtzeit-Ortungssystemen

⁹ Goldenberg (2005): Optimierung von Supply Chain Prozessen in der Bauwirtschaft durch mobile Technologien und Applikationen

¹⁰ Griebel (2000): Der zeitnahe Soll-Ist-Vergleich aus Sicht der Baustelle

¹¹ Heim (2002): Die zeitnahe Leistungsfeststellung auf Baustellen

¹² Kaiser (2013): Lean Process Management in der operativen Bauabwicklung

¹³ Kosel (2022): Ein Beitrag zur Prozessautomatisierung im Bauprojekt-Controlling

¹⁴ Mehr (2012): Polysensorale Bauprozessidentifikation durch kognitive Systeme

¹⁵ Pflug (2008): Ein Bildinformationssystem zur Unterstützung der Bauprozesssteuerung

¹⁶ Ruhl (2016): Entwicklung eines Baulogistikprozessmodells

¹⁷ Weil (2021): Ein Beitrag zur Anwendung der Lean Construction im schlüsselfertigen Hochbau

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung der Arbeit

Das Baulogistikprozessmodell definiert mit Bezug zum Projektverlauf die Phasen der Baulogistikinitiierung, der Baulogistikplanung, der Baulogistikorganisation und der Baulogistikrealisierung.¹⁸ Das Baulogistikprozessmodell stellt damit ein Integral hinsichtlich der Planung und Ausführung der Baulogistik dar.

Innerhalb der Phase der Baulogistikrealisierung kann sowohl in der Theorie als auch in der Praxis teilweise eine starke Trennung der einzelnen baulogistischen Subsysteme Versorgungs-, Produktions-, Entsorgungs- und Informationslogistik beobachtet werden. Neben der Trennung der einzelnen baulogistischen Subsysteme ist eine Durchführung der baulogistischen Prozesse durch die einzeln beauftragten Gewerke festzustellen. Dies kann zu einer mangelhaften Koordination der baulogistischen Prozesse führen. Durch die singuläre Betrachtung und Durchführung der baulogistischen Subsysteme und Prozesse entsteht ein Widerspruch zum Systemgedanken der Logistik. Dieser fordert für den Leistungserstellungsprozess ein Gesamtsystem, in dem die Interaktionen aller logistischen Einzelprozesse abgebildet und koordiniert werden. Zur Umsetzung dieses Systemgedankens sind gewerkeübergreifende Logistikkonzepte erforderlich.¹⁹ Diese Logistikkonzepte der Baulogistikrealisierung sind bereits in die vorgelagerten Phasen der Baulogistikinitiierung, Baulogistikplanung und Baulogistikorganisation zu berücksichtigen. Darüber hinaus können Baulogistikkonzepte ein erforderlicher Bestandteil respektive Voraussetzung für die Genehmigungsplanung werden und besitzen daher eine hohe Relevanz im Kontext der Baugenehmigung.²⁰

Bei der Baulogistikorganisation stellen dezentrale Aufbauorganisationen, bei denen die baulogistischen Aufgaben aufgeteilt werden, eine mögliche Organisationsform dar. Eine Alternative bieten zentrale Aufbauorganisationen, bei denen die einzelnen baulogistischen Aufgaben in einer Organisationseinheit zusammengefasst werden.²¹ Diese Zusammenfassung der Organisations- und Koordinierungsprozesse bieten Kosteneinsparungspotenziale und können durch die Adaption bereits bestehender unternehmensübergreifender Logistikkonzepte aus anderen Branchen weiter gesteigert werden.²² Hierzu sollten die Prozesse der Zulieferer und Produzenten innerhalb der Logistiksysteme und der logistischen Ketten intensiver berücksichtigt werden. Durch diese unternehmensübergreifende Sichtweise können die in der Literatur beschriebenen unterschiedlichen oder sogar gegensätzlichen Zielsetzungen der an den

¹⁸ Vgl. Ruhl (2016): Entwicklung eines Baulogistikprozessmodells, S. 88 f.

¹⁹ Vgl. Boenert/Blömeke (2003): Logistikkonzepte im Schlüsselfertigbau zur Erhöhung der Kostenführerschaft, S. 277

²⁰ Vgl. Ruhl (2016): Entwicklung eines Baulogistikprozessmodells, S. 88

²¹ Vgl. Krauß (2010): Organisationsmodelle für die Baulogistik in Deutschland, S. 20

²² Vgl. Günthner/Zimmermann (2008): Logistik in der Bauwirtschaft, S. 48

vorgelagerten Produktionsprozessen, an den Logistikprozessen sowie an den Bauproduktionsprozessen Beteiligten reduziert oder zumindest synchronisiert werden.²³

Diese unzureichende Integration und Berücksichtigung der Abhängigkeiten zwischen Fertigungs- und Logistikprozessen während der Bauproduktion sowie zwischen den verschiedenen Logistikprozessen untereinander hat zur Entwicklung von entsprechenden Planungsmodellen²⁴ und Lenkungssystemen²⁵ geführt. Für den Fall der Anwendung der Planungsmodelle durch einen Auftragnehmer aus der Sphäre des Schlüsselfertigbaus wurde der projektübergreifende Einsatz der Planungsmodelle diskutiert und Motivations- sowie Anreizstrukturen für eine übergeordnete Logistikplanung festgestellt.²⁶ Es gilt diese unternehmens- und projektübergreifenden Planungsmodelle durch adäquate und praxistaugliche Werkzeuge in die Ausführungsphase zu überführen.

In der Literatur können teilweise Begriffsdefinitionen zu einer externen und einer internen Baulogistik²⁷ festgestellt werden. Dem womöglich entstehenden Eindruck einer existierenden Trennung und Autonomie zwischen externer und interner Baulogistik ist aus o. g. Gründen entgegenzuwirken. Des Weiteren werden ganzheitliche und unternehmensübergreifende Konzepte, welche die baulogistischen Prozesse vom Baustoffzulieferer respektive Baustoffproduzenten über den Arbeitsplatz auf der Baustelle bis hin zu möglichen Entsorgungsprozessen beachten, in der Praxis selten umgesetzt.²⁸ Neben den zitierten Baustoffen sei an dieser Stelle angemerkt, dass die fehlenden ganzheitlichen und unternehmensübergreifenden Konzepte auch bei anderen baulogistischen Objekten wie bspw. Menschen, Bauhilfsstoffen, Medien, Betriebsmitteln oder Komponenten der Haustechnik festzustellen sind. Ebenso werden projektübergreifende Organisations- und Koordinationsmöglichkeiten zu wenig beachtet.²⁹ Die dargelegten Schwachstellen werden unter *Potenziale bei der Baulogistikorganisation und -koordination* subsummiert.

Durch die Nutzung der Potenziale der Baulogistikorganisation und -koordination können Probleme während der Baulogistikrealisierung reduziert oder sogar gänzlich eliminiert werden. Damit die beschriebenen baulogistischen Gesamtsysteme im Sinne eines Supply-Chain-Managements eine höhere Beachtung und eine häufigere praktische Umsetzung erfahren, sollten diese Gesamtsysteme mit dem Prozessmodell der Baulogistikplanung in Beziehung gesetzt sowie in das Prozessmodell integriert werden.

²³ Vgl. Binder (2014): Ereignisbasierte Steuerung baulogistischer Prozesse mit Echtzeit-Ortungssystemen, S. 42 ff.

²⁴ Vgl. Krauß (2005): Die Baulogistik in der schlüsselfertigen Ausführung, S. 87 ff.

²⁵ Vgl. Seemann (2007): Logistikkoordination als Organisationseinheit bei der Bauausführung, S. 2 ff.

²⁶ Vgl. Krauß (2005): Die Baulogistik in der schlüsselfertigen Ausführung, S. 127 f.

²⁷ Vgl. Helmus et al. (2009): RFID in der Baulogistik, S. 32

²⁸ Vgl. Franz/Funk (2007): Kosteneinsparungen und Rationalisierungseffekte durch ein zentrales Logistikmanagement im Wohnungsbau, S. 2

²⁹ Vgl. Sanladerer (2008): EDV-gestützte Disposition mit Telematikeinsatz und mobiler Datenerfassung in der Baulogistik, S. 10

Für die Phase der Baulogistikrealisierung, welche in dieser Arbeit schwerpunktmäßig betrachtet wird, werden in der Literatur ebenfalls verschiedene Schwachstellen respektive Verbesserungspotenziale beschrieben.

BERTELSEN³⁰ stellt u. a. eine Vielzahl von internen Transporten und Zwischenlagerungen auf der Baustelle sowie fehlerhafte Anlieferungen fest.

HELMUS et al.³¹ beschreiben lange Wartezeiten bis zum Entladen von Lieferfahrzeugen sowie ein verspätetes oder kurzfristiges Eintreffen der Lieferfahrzeuge.

HOFSTADLER³² formuliert eine Vielzahl an Transportern, die zu koordinieren sind sowie eine steigende Anzahl an Gewerken nach der Rohbauphase, die den Aufwand für die Logistik in den nachfolgenden Bauphasen beträchtlich erhöhen. Des Weiteren werden Platzprobleme und begrenzte Lagerflächen bei innerstädtischen Baustellen aufgeführt.

KRAUSS³³ unterstützt die Ausführungen von BERTELSEN sowie HELMUS et al. und ergänzt weitere Aspekte wie bspw. erforderliche Transport-, Such- und Umschlagprozesse auf der Baustelle sowie den Einbau und die Verarbeitung von mangelhaften, beschädigten oder falschen Baustoffen und Bauelementen.

SCHMIDT³⁴ erkennt ebenfalls die bereits erwähnten Probleme und konstatiert außerdem eine mangelhafte gewerkeübergreifende und prozessorientierte Baustellenversorgung sowie eine unzureichende Kommunikation zwischen den Baubeteiligten.

Als Ursache für die Schwachstellen können hauptsächlich fehlende und falsche Informationen, mangelhafte und dezentrale Anlieferungsorganisationen, eine Vielzahl von Anlieferungen und involvierter Personen, hohe Lagerbestände durch verfrühte Bestellungen und Bestellungen zu großer Mengen festgehalten werden.³⁵ Die dargelegten Schwachstellen und Ursachen sind durch eigene Untersuchungen zu validieren. Ergänzend zu den *Potenzialen bei der Baulogistikorganisation und -koordination* werden deshalb *Schwachstellen bei der Baulogistikrealisierung* konstatiert.

Der Forschungsbedarf zur Thematik des Supply-Chain-Managements in der Bauwirtschaft lässt sich außerdem durch einen Vergleich der Entwicklung der Begriffe „Logistik“ und „Baulogistik“ begründen. Die Entwicklung und das gegenwärtige Verständnis der Baulogistik entsprechen der Evolution der allgemeinen Logistik.³⁶ Hierbei ist ein zeitlicher Verzug in der baulogistischen Fortentwicklung festzustellen. Die nächsten Entwicklungsstufen der Baulogistik können somit anhand der zeitlichen Entwicklung der allgemeinen Logistik abgeleitet

³⁰ Vgl. Bertelsen/Nielsen (1997): Just-In-Time Logistics in the Supply of Building Materials, S. 4

³¹ Vgl. Helmus et al. (2009): RFID in der Baulogistik, S. 43 f.

³² Vgl. Hofstadler (2007): Bauablaufplanung und Logistik im Baubetrieb, S. 42 ff.

³³ Vgl. Krauß (2005): Die Baulogistik in der schlüsselfertigen Ausführung, S. 3 f.

³⁴ Vgl. Schmidt (2003): Wettbewerbsfaktor Baulogistik, S. 19 ff.

³⁵ Vgl. Krauß (2005): Die Baulogistik in der schlüsselfertigen Ausführung, S. 3 f.

³⁶ Vgl. Krauß (2005): Die Baulogistik in der schlüsselfertigen Ausführung, S. 20

werden. Die Integration von einzelnen Funktionen zu Prozessketten ist daher weiterzuentwickeln sowie zu festigen und die Integration von einzelnen Unternehmen respektive Prozessen zu Wertschöpfungsketten voranzutreiben.

Die Integration der einzelnen Unternehmen und Prozesse zu einer Supply-Chain erfordert einen durchgängigen Informationsfluss. Dieser erfährt durch die Aspekte „Digitalisierung“, „Internet der Dinge“ und „Industrie 4.0“ einen stetigen Wandel und eine rasante Weiterentwicklung. In der allgemeinen Logistik haben sich die Begriffe „Logistik 4.0“ und „IT-gestützte Logistik“ etabliert. Der technische Fortschritt ermöglicht und vereinfacht eine Verknüpfung sowie Vereinigung der Güter- und Informationsflüsse und damit verbunden eine verbesserte Kommunikation sowohl zwischen den Projektbeteiligten als auch mit der Projektraumumgebung. Ferner können mit dem technischen Fortschritt Prozessverbesserungen einhergehen. Die neuen Möglichkeiten und Anforderungen der modernen Technologien sind als weitere Aspekte in die vorliegende Arbeit mit einzubeziehen und zu berücksichtigen. Sie dienen als unterstützendes Element bei der Realisierung respektive der praktischen Umsetzung der Forschungsergebnisse.

Neben den *Potenzialen bei der Baulogistikorganisation und -koordination* sowie den *Schwachstellen der Baulogistikrealisierung* sind als weitere Ausgangssituation und Problemstellung der Arbeit die Einflüsse und die Auswirkungen der Lean Construction auf die Baulogistik zu erkennen und zu erläutern. Lean Construction setzt synchrone Produktions- und Logistikprozesse für eine schlanke Produktion voraus und fordert ein kooperatives Handeln aller Beteiligten. Dies führt zu einer Dominanz des Pull-Prinzips und somit zu einer für Lean Logistics typischen JIT-Belieferung von kleinsten Mengen.^{37, 38} Identisch zu den technologischen Entwicklungen müssen auch die neuen Herausforderungen und Möglichkeiten, die aus der Lean Logistics erwachsen, beachtet werden. Hervorzuheben sei an dieser Stelle die Umsetzung des JIT-Prinzips, welches gegenwärtig nur vereinzelt eine zielführende Anwendung findet.

³⁷ Vgl. Klug (2008): Gestaltungsprinzipien einer Schlanke Logistik, S. 56 ff.

³⁸ Vgl. Kaiser (2013): Lean Process Management in der operativen Bauausführung, S. 128 ff.

1.2 Abgrenzung und Ziele der Arbeit

Die Anforderungen an die Baulegistik in der Planungs- und Ausführungsphase steigen mit zunehmender Komplexität eines Bauprojekts. Auf Grund des Unikatcharakters von Bauprojekten sollte die Komplexität projektindividuell bewertet werden. Ein möglicher komplexer Projekttyp kann sich bei Großprojekten im urbanen Raum mit beengten Platzverhältnissen und begrenzten Lagerflächen ergeben. Daher wird die Arbeit auf diesen Projekttypus abgestellt. Des Weiteren wird explizit die Ausbauphase als Forschungsgegenstand definiert. Durch die höhere Anzahl an Gewerken in der Ausbauphase im Vergleich zu anderen Bauphasen potenzieren sich in der Ausbauphase die Herausforderungen, die an die Baulegistik gestellt werden. Ferner konzentriert sich die Arbeit auf die Versorgungslogistik bei Neubauprojekten. Eine Diskussion zur Übertragung der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit auf die Aspekte des Bauens im Bestand sowie der Entsorgungslogistik erfolgen an den entsprechenden Stellen im Verlauf der Arbeit. Die vorliegende Arbeit beschränkt sich außerdem auf die Untersuchung von unternehmensübergreifenden Versorgungskonzepten. Eine zusätzliche Erforschung von projektübergreifenden Versorgungskonzepten wird nicht angestrebt. Der projektübergreifende Ansatz respektive der Einsatz von unternehmensübergreifenden Versorgungskonzepten bei mehreren Projekten gleichzeitig, können zu weiteren positiven Effekten führen. Diese Effekte sind nicht Hauptgegenstand der vorliegenden Arbeit, werden aber ebenso wie die Aspekte des Bauens im Bestand sowie der Entsorgungslogistik an den entsprechenden Stellen im Verlaufe der Arbeit angesprochen.

Die Ziele der Arbeit ergeben sich aus der bereits dargestellten Ausgangssituation und Problemstellung der Arbeit und stellen somit auf eine Verbesserung der Baulegistik in der Phase der Baulegistikrealisierung bei komplexen Großprojekten im urbanen Raum ab. Den erhöhten Anforderungen an die Baulegistik bei diesem Projekttypus wird mit der vorliegenden Arbeit durch die Entwicklung eines Versorgungskonzepts für komplexe Großprojekte im urbanen Raum begegnet.

Hierbei wird die Arbeit durch die folgenden Forschungsfragen motiviert und geleitet:

- Welche Schwachstellen sind gegenwärtig in der Planung, Organisation und Realisierung der Baulegistik vorhanden?
- Welche Methoden führen zu einer Verbesserung dieser Schwachstellen?
- Welche technologischen Mittel der Digitalisierung können die Baulegistik unterstützen?

Eine integrale Antwort zu diesen Forschungsfragen führt zu der Forderung, dass die Baulegistik neu gedacht werden sollte. Das hierzu benötigte innovative Baustellenversorgungssystem wird im Zuge dieser Arbeit entwickelt. Durch die Betrachtung der Baulegistikrealisierungsphase ergeben sich Einflüsse und Auswirkungen auf die vorgelagerten Prozesse der

Baulegistikinitiiierung, der Baulegistikplanung und der Baulegistikorganisation. Die Abhängigkeiten und Einflüsse der verbesserten Versorgungsströme in der Realisierungsphase auf die vorgelagerten Planungsphasen sind entlang des gesamten Baulegistikprozesskonzepts zu untersuchen. Ferner soll durch die Berücksichtigung des Versorgungskonzepts in den frühen Planungsphasen die Akzeptanz der Ergebnisse in der Praxis erhöht und die Umsetzung vereinfacht werden. Aus diesen Gründen ergibt sich eine übergeordnete Forschungsfrage:

- Wie ist das zu entwickelnde ganzheitliche sowie zentral gesteuerte und unternehmensübergreifende Baustellenversorgungssystem zu gestalten und in das bestehende Baulegistikprozessmodell zu integrieren?

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist durch die Entwicklung eines Baustellenversorgungssystems zu erreichen. Diese Entwicklung wird auf der Grundlage einer Triangulation zwischen Literaturstudium, Baustellen- und Laborstudien sowie Experteninterviews durchgeführt.

An das zu entwickelnde Baustellenversorgungssystem werden verschiedene Anforderungen gestellt, die ein baulegistisches Gesamtsystem implizieren, bei dem die vorgelagerten Prozesse der Produktion und der Logistik sowie der Bauproduktion und Baulegistik zu übergeordneten Prozess- und Wertschöpfungsketten zusammengeführt werden. In der allgemeinen Logistik wird diesen Anforderungen mit einem Supply-Chain-Management begegnet. Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist daher das unternehmensübergreifende Supply-Chain-Management im Bauwesen und hier im Besonderen die Untersuchung der Versorgungssituation der Baustelle im Kontext der Supply-Chain der Baustoffe.

Innerhalb des Supply-Chain-Managements der allgemeinen Logistik kommen verschiedene Zuliefer- und Distributionsnetze zum Einsatz. Bauprojekte sind u. a. durch eine ortsveränderliche Unikatproduktion charakterisiert. Hierdurch wird für jedes Bauprojekt eine einmalige sowie ortsabhängige Baulegistik erforderlich und die direkte und unmittelbare Übertragung von Konzepten der allgemeinen Logistik erschwert. Im Kontext der Entwicklung des idealtypischen Baustellenversorgungssystems stellen die Zuliefer- und Distributionsnetze der allgemeinen Logistik und hier im Besonderen der Ansatz der Warenverteilzentren interessante Anknüpfungspunkte dar, welche somit innerhalb der Versorgungslogistik ortsfeste, zentrale und standardisierte Prozesse ermöglichen.

Die Potenziale und Einsatzmöglichkeiten von Warenverteilzentren bei Bauprojekten sind zwar in der Literatur beschrieben, eine Integration und wissenschaftliche Einordnung in ein ganzheitliches Baulegistikprozessmodell und somit eine Berücksichtigung in den Planungsphasen respektive eine Beachtung der Auswirkungen auf die Planung findet jedoch nicht statt und stellt daher eine Forschungslücke dar. Neben dem Ziel, ein Baustellenversorgungssystem im Sinne eines Supply-Chain-Managements im Bauwesen zu realisieren, ist, wie bereits er-

läutert, daher ein weiteres Hauptziel, dieses Baustellenversorgungssystem in dem bestehenden Baulogistikprozessmodell abzubilden und somit die genannte Forschungslücke zu schließen.

Um dieses Ziel zu erreichen, ergeben sich weitere Unterziele der Arbeit. Das Baulogistikprozessmodell ist zu ergänzen und zu erweitern. Hierzu sind die Baulogistikattribute zu überprüfen und anzupassen sowie ggf. weitere Attribute hinzuzufügen. Die projektspezifischen Anforderungen, die die Versorgung der Baustelle über ein Warenverteilzentrum erforderlich machen können, werden herausgearbeitet und dienen in der Planungsphase als Entscheidungshilfe, inwiefern der Einsatz eines Warenverteilzentrums intensiver zu prüfen ist. Darüber hinaus ist das entwickelte Baustellenversorgungssystem hinsichtlich der Aspekte der Nachhaltigkeit zu betrachten.

Diese Arbeit und damit verbunden die Verbesserung der Versorgungslogistik soll zu einer positiven Beeinflussung der Transportanzahl und Transportdichte im urbanen Raum führen. Die Ergebnisse der Arbeit sollen somit der branchenübergreifenden und gesamtgesellschaftlichen aktuellen Diskussion zu vielfältigen Umweltaspekten Rechnung tragen und zielen darauf ab, die Baulogistik nachhaltiger zu gestalten und Emissionen zu reduzieren.

Insbesondere durch die übergeordnete Forschungsfrage wird die Arbeit thematisch verortet. Innerhalb der baubetriebswissenschaftlichen Forschung ist die Arbeit in den Forschungsbereich des Bauprozessmanagements einzuordnen. Ein Aspekt des Bauprozessmanagements ist der Forschungsgegenstand der vorliegenden Arbeit, die Baulogistik. Außerdem ergeben sich Schnittstellen zur sensorgestützten Echtzeitsteuerung und im Forschungsbereich der Bauorganisation zur Lean Construction. Neben dieser generellen thematischen Verortung kann der Forschungsgegenstand anhand des Prozesskonzepts der Baulogistik präzise verortet werden.

1.3 Forschungsmethodik der Arbeit

Die Baubetriebswissenschaft ist nach ULRICH/HILL innerhalb der Wissenschaftssystematik den Realwissenschaften zuzuordnen. Das Ziel der baubetriebswissenschaftlichen Forschung als Ingenieurwissenschaft ist die Analyse und die Gestaltung von sozio-technischen Systemen. Die Baubetriebswissenschaft stellt somit eine angewandte Wissenschaft respektive eine Handlungswissenschaft dar.³⁹

Die sozio-technischen Systeme der Baubetriebswissenschaften können durch ein hermeneutisches, realwissenschaftliches Wissenschaftsverständnis und Vorgehen interpretiert und gestaltet werden.⁴⁰ Die hermeneutischen Wissenschaften werden charakterisiert durch die Entstehung des Forschungsgegenstands respektive des Problems in der Praxis sowie dem Forschungsziel, eine neue, „bessere“ Wirklichkeit zu entwerfen. Diese „bessere“ Wirklichkeit entsteht in der hermeneutischen Forschung durch zum einen aktionale Gestaltungsmodelle und zum anderen durch phänomenologische Erklärungsmodelle. Sowohl die Entstehung des Problems als auch das Forschungsziel sind stark anwendungsorientiert und werden durch die Praxis geprägt.⁴¹

Der Erkenntnisgewinnungsprozess zur Erlangung des benötigten Wissensstands um phänomenologische Erklärungsmodelle und aktionale Gestaltungsmodelle formulieren zu können, lässt sich durch die hermeneutische Wissenswachstumsspirale beschreiben. Das vorhandene Vorverständnis wird durch eine Untersuchung gesteigert und führt zu einem neuen, weiterentwickelten Gegenstandsverständnis, welches wiederum Basis und Vorverständnis für eine weitere Untersuchung ist. Dieser Zyklus wird solange durchlaufen, bis ein befriedigendes Gegenstandsverständnis vorhanden ist.⁴²

Durch das realwissenschaftliche Denken und damit verbunden dem interpretativen Verstehen, entstehen Subjektivitäts- und Kommunikationsprobleme. Diesen Problemen ist im wissenschaftlichen Forschungsprozess durch einen Entdeckungszusammenhang, einen Begründungszusammenhang und einen Verwendungszusammenhang zu begegnen. Durch den Entdeckungszusammenhang werden ein gedanklicher und theoretischer Bezugsrahmen sowie eine konzeptionelle Basis geschaffen. Der Begründungszusammenhang erfasst die Methodik zur empirischen Überprüfung des gedanklichen Bezugsrahmens. Der Verwendungszusammenhang verdeutlicht den Zweck und die Verwendung der wissenschaftlichen Erkenntnisse.⁴³

³⁹ Vgl. Ulrich/Hill (1979): Wissenschaftstheoretische Aspekte ausgewählter betriebswissenschaftlicher Konzeptionen, S. 163 f.

⁴⁰ Vgl. Girmscheid (2007): Forschungsmethodik in den Baubetriebswissenschaften, S. 66

⁴¹ Vgl. Girmscheid (2007): Forschungsmethodik in den Baubetriebswissenschaften, S. 74 ff.

⁴² Vgl. Girmscheid (2007): Forschungsmethodik in den Baubetriebswissenschaften, S. 63

⁴³ Vgl. Ulrich/Hill (1979): Wissenschaftstheoretische Aspekte ausgewählter betriebswissenschaftlicher Konzeptionen, S. 164 ff.

Die allgemeinen Forschungsziele der Baubetriebswissenschaften lassen sich in theoretische Ziele wie bspw. Verständnis der Realität, Aufbau einer Theorie oder eines Modells und praktische Ziele wie bspw. Erklärung, Gestaltung und Verbesserung der Wirklichkeit zur Unterstützung der Praxis bei der Bewältigung von konkreten, anwendungsorientierten Problemen unterteilen. Praktische und theoretische Ziele ergänzen sich dabei und gehen Hand in Hand.⁴⁴

Durch die konkreten Ziele der vorliegenden Arbeit sowie den allgemeinen Forschungszielen der Baubetriebswissenschaften ergibt sich ein konkreter Forschungsprozess für die vorliegende Arbeit. Aufbauend auf der Identifikation des Forschungsproblems und der Forschungslücke sowie einem Vorverständnis des Forschenden zum Forschungsgegenstand Baulogistik werden Hypothesen formuliert. Diese Hypothesen werden durch den o. g. Erkenntnisgewinnungsprozess anhand qualitativer und quantitativer Forschungsmethoden geprüft sowie verifiziert oder falsifiziert. Als Forschungsergebnis wird ein phänomenologisches Erklärungsmodell der Wirklichkeit entwickelt. Neben den Hypothesenprüfungen und dem phänomenologischen Erklärungsmodell wird, ebenfalls aufbauend auf der Identifikation des Forschungsproblems und der Forschungslücke sowie dem Vorverständnis des Forschenden zum Forschungsgegenstand, ein aktionales Gestaltungsmodell für den Forschungsgegenstand Baulogistik entworfen. Eine Überprüfung der wissenschaftlichen Erkenntnisse hinsichtlich der intendierten Wirkung sowie der wissenschaftlichen Güte erfolgt über die Integration in den theoretischen Bezugsrahmen der Arbeit sowie anhand durchzuführender Realisierbarkeitstests.⁴⁵

Durch die beiden erkenntnistheoretischen Paradigmen des Interpretativismus, bei dem die Ursachen und Wirkungen phänomenologisch erklärt werden, und des Konstruktivismus, bei dem neue soziale und technische Realitäten auf Basis von Ziel-Mittel-Beziehungen konstruiert werden, liegt der Arbeit ein sich ergänzender Multi-Paradigma-Ansatz zu Grunde.^{46, 47} Die existierende Realität wird interpretativistisch eingefangen und konstruktivistisch neu gestaltet.⁴⁸

Der Ablauf des Forschungsprozesses der vorliegenden Arbeit kann, wie in Abbildung 1 zu sehen, in sieben Phasen gegliedert werden. Die Verknüpfungen und Abhängigkeiten zwischen dem Ablauf des Forschungsprozesses und der inhaltlichen Ausrichtung der Arbeit werden im Zuge des Aufbaus der Arbeit in Kapitel 1.4 behandelt.

⁴⁴ Vgl. Girmscheid (2007): Forschungsmethodik in den Baubetriebswissenschaften, S. 94

⁴⁵ Vgl. Girmscheid (2007): Forschungsmethodik in den Baubetriebswissenschaften, S. 90

⁴⁶ Vgl. Girmscheid (2007): Forschungsmethodik in den Baubetriebswissenschaften, S. 81 f.

⁴⁷ Vgl. Girmscheid (2007): Forschungsmethodik in den Baubetriebswissenschaften, S. 87

⁴⁸ Vgl. Girmscheid (2007): Forschungsmethodik in den Baubetriebswissenschaften, S. 98

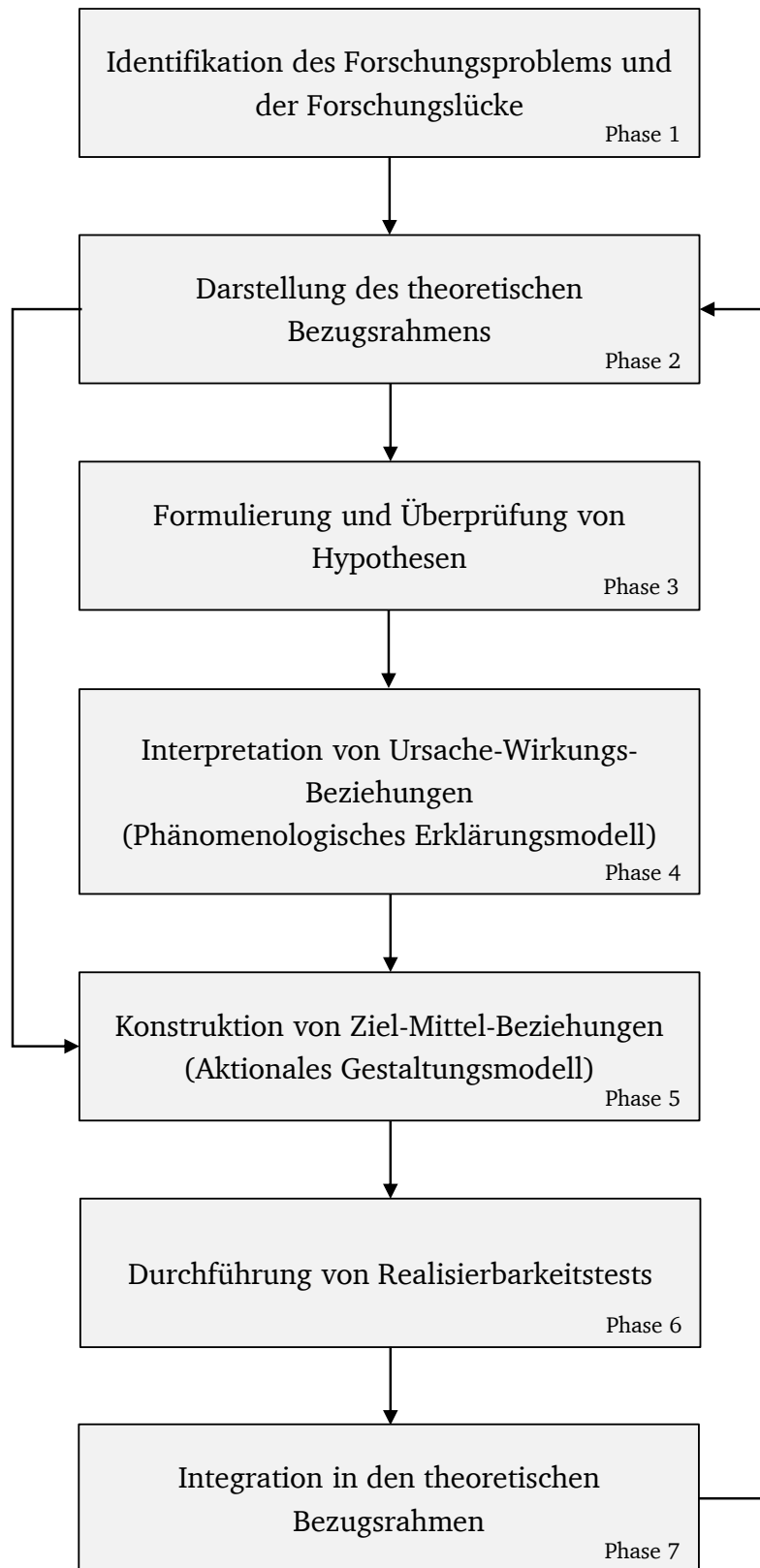


Abbildung 1: Ablauf des Forschungsprozesses⁴⁹

⁴⁹ Eigene Darstellung

1.4 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in sechs Kapitel und besteht aus einem deskriptiven, einem empirischen und einem integrativen Teil. Im Folgenden werden der Aufbau der Arbeit, die Inhalte und Ziele der einzelnen Kapitel sowie deren inhaltlichen Zusammenhänge erläutert. Eine Visualisierung zum Aufbau der Arbeit kann Abbildung 2 entnommen werden.

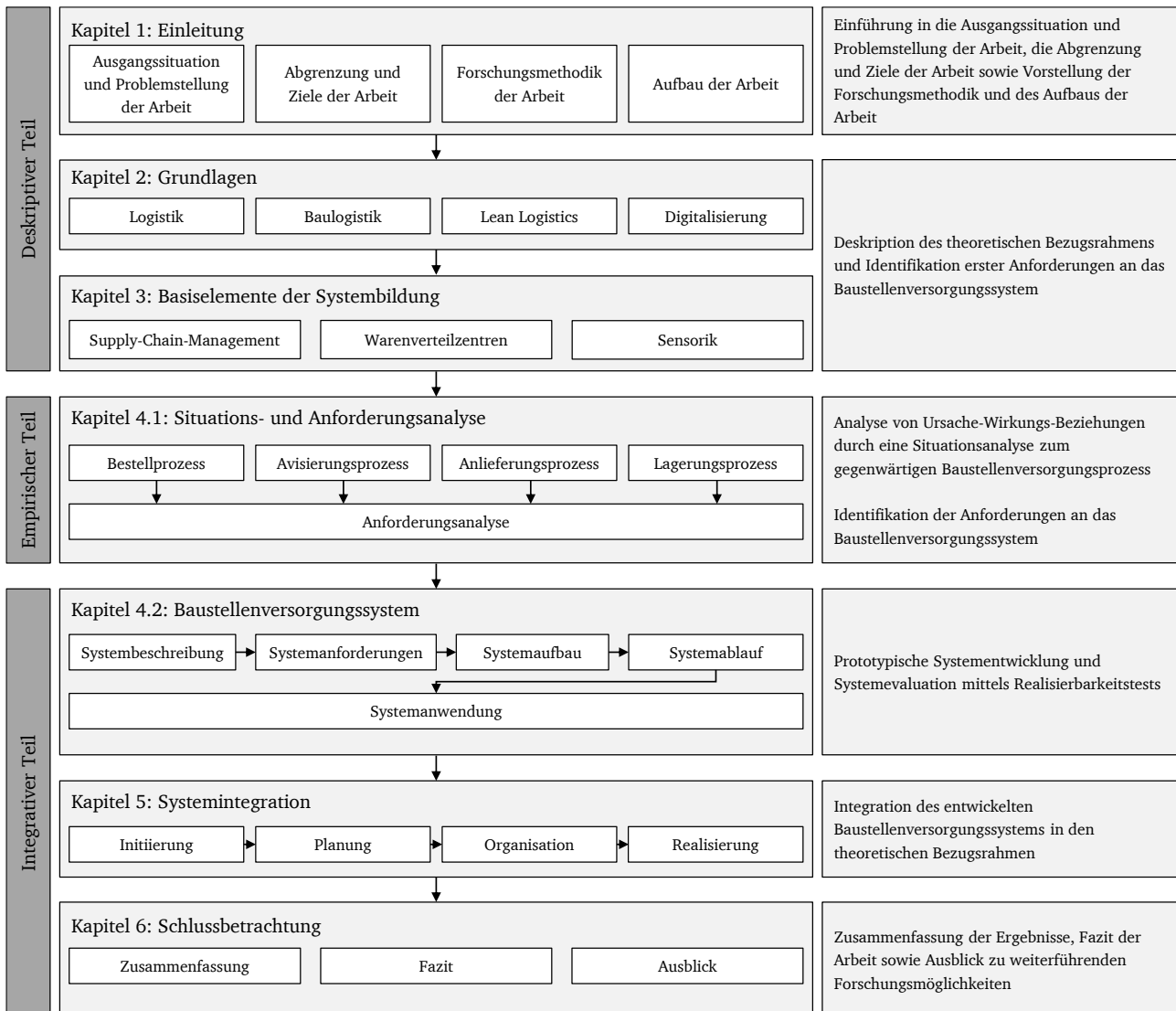


Abbildung 2: Aufbau der Arbeit⁵⁰

Das einleitende Kapitel 1 beschreibt die Ausgangssituation und die Problemstellung der Arbeit, erläutert die Zielsetzung der Arbeit und grenzt die Arbeit thematisch ein. Außerdem wird das wissenschaftliche Vorgehen durch die Forschungsmethodik und den Aufbau der Arbeit dargelegt.

⁵⁰ Eigene Darstellung

In Kapitel 2 werden die Grundlagen zur Logistik, zur Baulogistik, zur Lean Logistics sowie zur Digitalisierung erörtert. Zunächst werden verschiedene Begriffsdefinitionen sowie die Entwicklungen der Logistik wiedergegeben. Anschließend erfolgt eine Vorstellung zu den möglichen Organisations- und Koordinationsformen der Logistik sowie zum Themenfeld der Logistikketten. Die Grundlagen zur Baulogistik beinhalten ebenso zuerst eine Darstellung der verschiedenen Begriffsdefinitionen und den Entwicklungen der Baulogistik sowie eine Beschreibung zu den möglichen Organisations- und Koordinationsformen der Baulogistik. Des Weiteren wird der Stand der Forschung zur Baulogistik sowie das Baulogistikprozessmodell von RUHL vorgestellt. Die Grundlagenkapitel zur Lean Logistics sowie zur Digitalisierung beinhalten ebenfalls eine Übersicht zu den Begriffsdefinitionen und den Entwicklungen sowie zu den Auswirkungen des entsprechenden Themenfeldes auf die Logistik und die Baulogistik respektive den Baubetrieb. Kapitel 2 bildet die allgemeine Grundlage zur weiteren thematischen Präzisierung dieser Arbeit in Kapitel 3. Die Ausführungen zum Baulogistikprozessmodell von RUHL stellen den Ausgangspunkt für die in Kapitel 5 durchgeführte Integration des entwickelten Baustellenversorgungssystems dar.

Kapitel 3 erläutert die Basiselemente der Systembildung. Nach einer Beschreibung zum Supply-Chain-Management in der Logistikbranche erfolgt eine Betrachtung des Supply-Chain-Managements in der Bauindustrie und in diesem Kontext eine Darstellung zum gegenwärtigen Stand einer branchenspezifischen Übertragung. Zur Einordnung der Ausführungen zu Warenverteilzentren in der Bauindustrie werden zunächst die Grundlagen zu Warenverteilzentren in der Logistikbranche geschildert. Nach der Darstellung des Baustellenversorgungsprozesses über ein Warenverteilzentrum und in diesem Zuge den Erläuterungen zu den allgemeinen Ausprägungen und Grundfunktionen von Warenverteilzentren in der Bauindustrie erfolgt auf Basis bereits durchgeführter und dokumentierter Projekte eine Diskussion und Analyse zum gegenwärtigen Stand hinsichtlich des Einsatzes von Warenverteilzentren in der Bauindustrie sowie zu deren Potenzialen und positiven Auswirkungen. Abgeschlossen wird das Kapitel mit Erläuterungen zu den Grundlagen der Sensorik. Die Ausführungen dieses Kapitels dienen als Grundlage sowie zur Einordnung des in Kapitel 4 entwickelten Baustellenversorgungssystems. Das Kapitel 3 stellt somit gemeinsam mit Kapitel 2 den theoretischen Bezugsrahmen der Arbeit dar. Mit Kapitel 3 wird der deskriptive Teil dieser Arbeit, bestehend aus den Kapiteln 1, 2 und 3, abgeschlossen. Hierbei ist zu erwähnen, dass die in Kapitel 3 durchgeführte Analyse und Diskussion zu Warenverteilzentren in der Bauindustrie stellenweise keinen rein deskriptiven Charakter besitzt, da in diesem Zuge erste Anforderungen an das zu entwickelnde Baustellenversorgungssysteme abgeleitet, identifiziert und erläutert werden, die als Grundlage für die Systementwicklung und Systemevaluation dienen.

In Kapitel 4 werden die Systementwicklung und die Systemevaluation des Baustellenversorgungssystems erläutert. Die Notwendigkeit der Systementwicklung wird, weiterführend zu

den bereits gewonnen Erkenntnissen, durch eine Situationsanalyse zum gegenwärtigen Baustellenversorgungsprozess und einer darauf aufbauenden Anforderungsanalyse belegt. Die Untersuchungen und Analysen zum gegenwärtigen Baustellenversorgungsprozess in Form der Situations- und Anforderungsanalyse erfolgen dabei entlang der Prozesskette Bestellung, Avisierung, Anlieferung und Lagerung und stellen den empirischen Teil der Arbeit dar. Anschließend werden die Systementwicklung und die Systemevaluation des Baustellenversorgungssystems dargelegt. Hierzu wird zunächst eine Systembeschreibung durchgeführt, um im Zuge dessen neben der nötigen Integration eines Warenverteilzentrums in das Baustellenversorgungssystem auch die Notwendigkeit eines polysensoralen Systems innerhalb des Baustellenversorgungssystems zu verdeutlichen. Die bereits innerhalb der Systembeschreibung aufgezeigten Anforderungen an das polysensorale System werden anschließend nach funktionalen und technischen Systemanforderungen gegliedert und konkretisiert. Aufbauend auf den definierten Systemanforderungen werden der Systemaufbau sowie der Systemablauf entwickelt und dargestellt. Abschließend erfolgt die prototypische Umsetzung und Evaluation des entwickelten Systems durch definierte Anwendungsfälle in Form von Labor- und Feldversuchen.

In Kapitel 5 erfolgt die Integration des entwickelten Baustellenversorgungssystems in das bestehende Baulogistikprozessmodell. Hierbei wird die Integration nach den Phasen der Baulogistikinitiierung, -planung, -organisation und -realisierung differenziert und entsprechend dargestellt. Die Systementwicklung und die Systemevaluation des Baustellenversorgungssystems in Kapitel 4, die Systemintegration in Kapitel 5 sowie die Schlussbetrachtung in Kapitel 6 bilden den integrativen Teil dieser Arbeit und verbinden die Ergebnisse des empirischen Teils mit den theoretischen Grundlagen des deskriptiven Teils.

Das abschließende Kapitel 6 fasst die wesentlichen Ergebnisse der Arbeit zusammen und beinhaltet das Fazit der Arbeit. Außerdem erfolgt ein Ausblick zu weiteren Entwicklungspotenzialen und zukünftigen Forschungsmöglichkeiten.

2 Grundlagen

Das nachfolgende Grundlagenkapitel bietet zunächst einen Überblick zum Themenfeld der Logistik. Anschließend erfolgt eine Darstellung zu den Grundlagen der Baulogistik sowie zum Themenfeld der Lean Logistics. Abgeschlossen wird das Grundlagenkapitel mit einer kurzen Kommentierung zur Digitalisierung der Bauwirtschaft. Die vier angesprochenen Themenfelder werden hierbei stets unter Berücksichtigung sowie mit Bezug zum intendierten Ziel dieser Arbeit erläutert.

2.1 Logistik

Im folgenden Unterkapitel werden die Grundlagen zur Logistik dargestellt. Hierzu werden zuerst verschiedene Begriffsdefinitionen sowie die Entwicklungen der Logistik wiedergegeben. Anschließend erfolgt eine Vorstellung zu den möglichen Organisations- und Koordinationsformen der Logistik. Die Ausführungen zum Themenfeld der Logistikketten bilden den Abschluss des Unterkapitels.

2.1.1 Begriffsdefinitionen und Entwicklungen der Logistik

Der Begriff Logistik erfährt eine stetige Weiterentwicklung und ist vielfältig definiert. Logistik kann als Sammelbegriff für den Transfer von Gütern und Waren in allen Bereichen der Industrie und im Handel verstanden werden. Neben der Durchführung der Logistikprozesse sind hiermit Investitionen in die technischen Einrichtungen des Material- und Informationsflusses sowie organisatorische und planerische Prozesse verbunden.⁵¹ Die DIN EN 14943 definiert als Logistik die *„Planung, Ausführung und Steuerung der Bewegung und der Bereitstellung von Menschen und/oder Waren und der unterstützenden Tätigkeiten in Bezug auf diese Bewegung und Bereitstellung innerhalb eines zum Erreichen spezieller Ziele organisierten Systems.“*⁵²

Definitionen zur Logistik sind bereits u. a. in Veröffentlichungen zum Militärwesen im 9. Jahrhundert zu finden. Eine detaillierte Auseinandersetzung mit dem historischen Wortgebrauch und daraus abgeleitet der Relevanz der Logistik sowie der Verknüpfung zwischen Menschheitsgeschichte, technischer Entwicklung und Logistik liefert JÜNEMANN⁵³.

Je nach Sichtweise und Betrachtungshorizont ist eine Vielzahl an Definitionen zur Logistik zu finden. Einen Überblick über die unterschiedlichen Logistikdefinitionen respektive -konzeptionen geben u. a. HAUSLADEN⁵⁴, HEISERICH et al.⁵⁵ und GÖPFERT⁵⁶. Die verschiedenen Definitionsansätze können grundsätzlich nach fluss-, lebenszyklus- und dienstleistungsorientierten Betrachtungen unterschieden werden. Bei flussorientierten Betrachtungen stehen der Güterfluss zwischen einem Liefer- und Empfangspunkt und die damit zusammenhängende raumzeitliche Gütertransformation im Fokus. Lebenszyklusorientierte Ansätze setzen die logistischen Prozesse als unterstützende Transformationsprozesse in Verbindung zu den Lebenszyklusphasen – Planung, Entwurf, Realisierung, Betrieb und Stilllegung eines Produkts

⁵¹ Vgl. Arnold et al. (2008): Handbuch Logistik, Vorwort zur 3. Auflage

⁵² DIN EN 14943 (2006): Transportdienstleistungen – Logistik – Glossar, S. 67

⁵³ Vgl. Jünemann (1989): Materialfluß und Logistik, S. 3 ff.

⁵⁴ Vgl. Hausladen (2014): IT-gestützte Logistik, S. 5

⁵⁵ Vgl. Heiserich et al. (2011): Logistik, S. 8 ff.

⁵⁶ Vgl. Göpfert (2013): Logistik, S. 6 ff.

oder eines Systems. Die dienstleistungsorientierte Definition der Logistik beruht auf dem Gedanken, dass eine Dienstleistung einem Kunden nur bestmöglich zur Verfügung gestellt werden kann, wenn alle Produktionsaktivitäten koordiniert erbracht werden.⁵⁷

Nach FLEISCHMANN lässt sich bei den verschiedenen Definitionen eine Schnittmenge von gemeinsamen Elementen feststellen. Den verschiedenen Definitionen ist gemeinsam, dass der Logistik die Aufgabe der Raum- und Zeitüberbrückung zugesprochen wird. Hierzu ist ein Informations- und Kommunikationssystem nötig und die Prozesse werden ganzheitlich und interdisziplinär betrachtet.⁵⁸ Die Interdisziplinarität beruht auf den von JÜNEMANN definierten drei Säulen der Logistik – Technik, Informatik sowie Betriebs- und Volkswirtschaft.⁵⁹

Ausgehend von bspw. der folgenden Definition der Logistik nach PFOHL können vier wesentliche Entwicklungsstufen der Logistik konstatiert werden.

„Zur Logistik gehören alle Tätigkeiten, durch die Bewegungs- und Speichervorgänge in einem Netzwerk gestaltet, gesteuert oder kontrolliert werden. Durch das Zusammenspiel dieser Tätigkeiten soll ein Strom von Objekten durch das Netzwerk in Gang gesetzt werden, derart, daß Raum und Zeit möglichst effektiv überbrückt werden.“⁶⁰

Die Entwicklungsstufen sind in Abbildung 3 gezeigt und werden in Publikationen von u. a. BAUMGARTEN⁶¹, BLUM⁶², KLAUS⁶³, NYHIUS⁶⁴ und WILDEMANN⁶⁵ intensiv diskutiert.

⁵⁷ Vgl. Pfohl (2018): Logistiksysteme, S. 12 f.

⁵⁸ Vgl. Fleischmann (2018): Begriffliche Grundlagen der Logistik, S. 1 f.

⁵⁹ Vgl. Jünemann (1989): Materialfluß und Logistik, S. 10

⁶⁰ Pfohl (1972): Marketing – Logistik, S. 18

⁶¹ Vgl. Baumgarten (2008): Das Beste der Logistik – Auf dem Weg zu logistischer Exzellenz, S. 13 ff.

⁶² Vgl. Blum (2006): Logistik-Controlling, S. 9 ff.

⁶³ Vgl. Klaus (2002): Die dritte Bedeutung der Logistik, S. 7 ff. und S. 81 ff.

⁶⁴ Vgl. Nyhius (2008): Entwicklungsschritte zu Theorien der Logistik, S. 2 ff.

⁶⁵ Vgl. Wildemann (2008): Entwicklungspfade der Logistik, S. 163 ff.

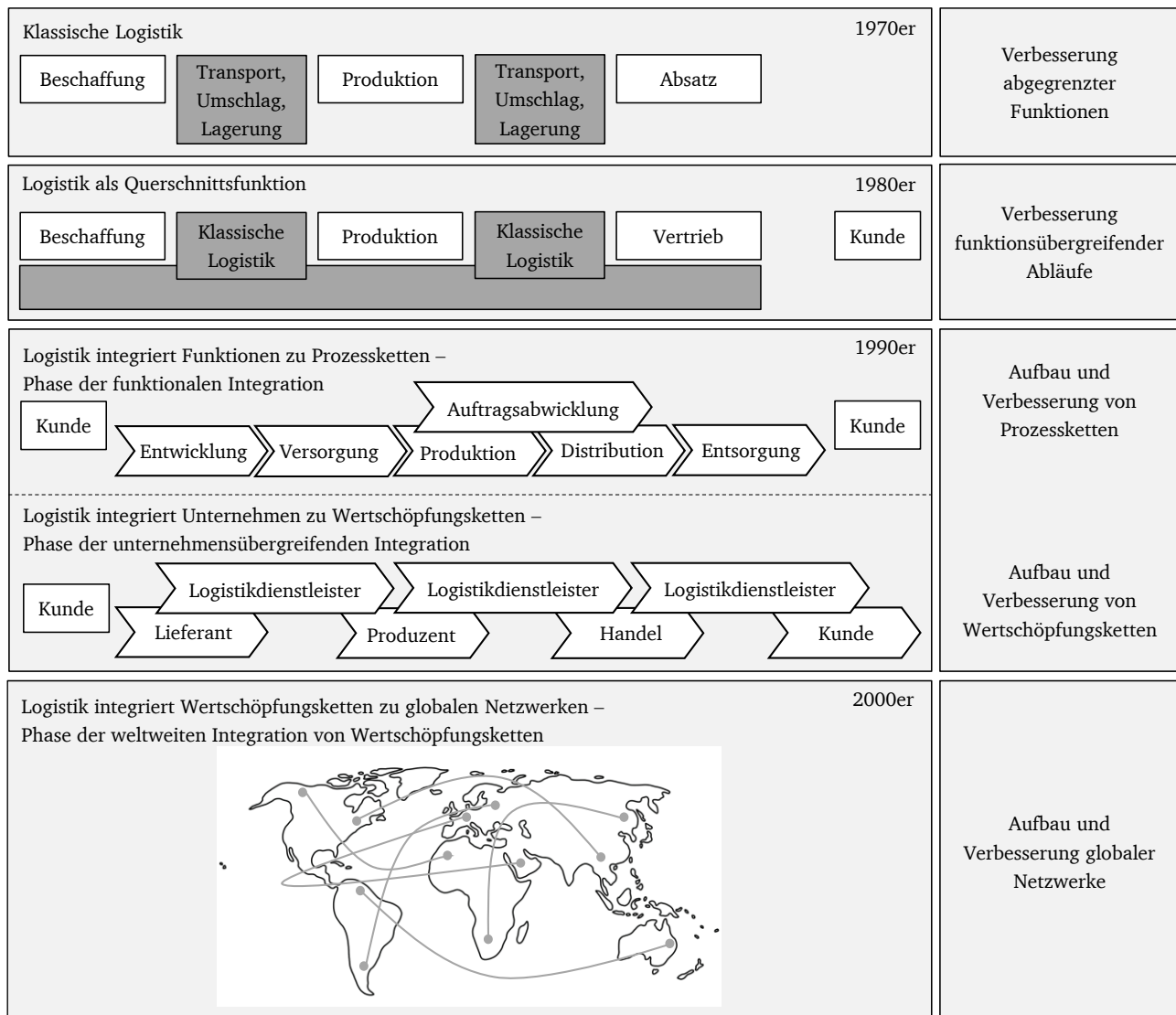


Abbildung 3: Entwicklungsstufen der Logistik⁶⁶

Die erste Entwicklungsstufe der Logistik ist geprägt durch eine relativ isolierte Betrachtung sowie Reduzierung und Fokussierung auf die logistischen Kernprozesse innerhalb einzelner Wertschöpfungsstufen respektive abgegrenzter Funktionsbereiche. Die logistischen Kernprozesse, auch als TUL-Prozesse bezeichnet, sind der Transport, definiert als „unterstützte Bewegung von Menschen und/oder Gütern“⁶⁷, der Umschlag, definiert als „Handlung, durch die Waren von einem Transportmittel zu einem anderen im Verlauf von einem Transportvorgang umgelagert werden“⁶⁸ und die Lagerung, definiert als „Vorgang, Waren vorrätig oder in geeigneten Räumen zu halten, um die Zeit zwischen deren Ankunft und Einsatz zu überbrücken.“⁶⁹ Die

⁶⁶ In Anlehnung an Baumgarten (2008): Das Beste der Logistik – Auf dem Weg zu logistischer Exzellenz, S. 14

⁶⁷ DIN EN 14943 (2006): Transportdienstleistungen – Logistik – Glossar, S. 129

⁶⁸ DIN EN 14943 (2006): Transportdienstleistungen – Logistik – Glossar, S. 128

⁶⁹ DIN EN 14943 (2006): Transportdienstleistungen – Logistik – Glossar, S. 121

nachfolgende Beachtung der Schnittstellen zwischen den einzelnen Funktionsbereichen führt zu funktionsübergreifenden Abläufen sowie einer funktionsübergreifenden Logistik als Querschnittsfunktion. Dies stellt die nächste Entwicklungsstufe der Logistik dar, die als positives Resultat die Reduzierung von Zwischenbeständen sowie Durchlauf- und Lieferzeiten in der Lieferkette zur Folge hat. Die dritte Entwicklungsstufe der Logistik wird durch neue Anforderungen an die Prozessabwicklung sowie Einführung neuer Produktionsmethoden initiiert. Einzelne Prozesse und Funktionen werden zu Prozess- und Wertschöpfungsketten zusammengefasst. Die dritte Entwicklungsstufe, bei der die Integration im Fokus steht, lässt sich in zwei Entwicklungsschritte gliedern. In einem ersten Entwicklungsschritt innerhalb der dritten Entwicklungsstufe stehen die Integration der Produktionsprozessketten und die Produktivitätssteigerung in einzelnen Unternehmen im Mittelpunkt. Diesem Entwicklungsschritt folgt die Betrachtung und Integration von unternehmensübergreifenden Wertschöpfungsketten, dem zweiten Entwicklungsschritt der dritten Entwicklungsstufe. Auf dieser Grundlage baut die vierte Entwicklungsstufe der Logistik auf. Die Integration des Gesamtwertschöpfungsprozess wird nicht mehr nur unternehmensübergreifend sondern global realisiert. Es entstehen globale Netzwerke die durch ein Supply-Chain-Management gesteuert und begleitet werden.⁷⁰

WEBER untergliedert und ergänzt die beschriebenen Entwicklungsstufen aus betriebswirtschaftlicher Sicht. Die erste Entwicklungsstufe entspricht einer funktionalen Spezialisierung und Dienstleistungsfunktion der Logistik auf der operativen Materialflussebene und ist Grundlage für die flussbezogene Koordinationsfunktion, die durch die zweite Entwicklungsstufe charakterisiert wird und auf der taktischen Materialflussebene zu verorten ist. Die dritte Entwicklungsstufe beschreibt die Durchsetzung des Flussprinzips und die Logistik als Flussorientierung im gesamten Unternehmen. Die Logistik entwickelt sich von einer Dienstleistungsfunktion zu einer Führungsfunktion. Die vierte Entwicklungsstufe nach WEBER ist die unternehmensübergreifende Flussorientierung der Logistik, das Supply-Chain-Management. Die flussorientierten Ansätze der dritten und vierten Entwicklungsstufe sind der strategischen Managementebene zuzuordnen.^{71, 72}

Die aktuellen Entwicklungen der IT beeinflussen die Evolution der Logistik maßgeblich. Auf diese Entwicklungen und eine daraus resultierende mögliche fünfte Entwicklungsstufe der Logistik wird in Kapitel 2.4.2 eingegangen.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Logistik mindestens die Aspekte Kundenorientierung sowie die Bildung von Prozessen und Strukturen zum räumlichen und zeitlichen

⁷⁰ Vgl. Baumgarten (2008): Das Beste der Logistik – Auf dem Weg zu logistischer Exzellenz, S. 13

⁷¹ Vgl. Weber (2008): Überlegungen zu einer theoretischen Fundierung der Logistik in der Betriebswirtschaftslehre, S. 46 ff.

⁷² Vgl. Voigtmann (2014): Simulation baulogistischer Prozesse im Ausbau, S. 9

Transfer von Objekten und die Planung, Realisierung, Steuerung und Kontrolle dieser Prozesse und Strukturen beinhaltet.⁷³ Als Zielfunktion dienen dabei die "Seven-Rights" der Logistik nach PLOWMAN⁷⁴, die von HAUSLADEN⁷⁵ um die richtige Information und nach GÜNTHER/ZIMMERMANN⁷⁶ mit dem ökologisch Richtigen zu 9Rs erweitert werden. Die Aufgabe und das Ziel der Logistik besteht darin, die richtigen Güter und Objekte, zur richtigen Zeit, am richtigen Ort, in der richtigen Menge, in der richtigen Qualität, zu den richtigen Kosten, dem richtigen Kunden mit den richtigen Informationen ökologisch richtig zur Verfügung zu stellen.

Die Aufgaben der Logistik werden durch Logistiksysteme realisiert. Diese Logistiksysteme sind durch die unterschiedlichen Betrachtungsebenen und ihren differierenden Umfang, wie in den beiden nachfolgenden Abbildungen gezeigt, sowohl institutionell als auch funktionell abzugrenzen.⁷⁷

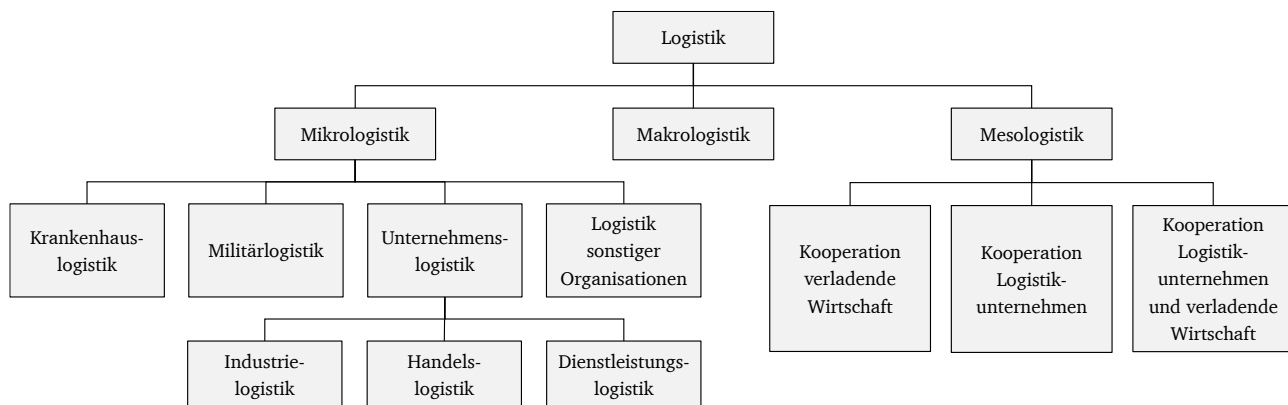


Abbildung 4: Institutionelle Abgrenzung von Logistiksystemen⁷⁸

Die institutionelle Abgrenzung von Logistiksystemen beruht auf der in der Volkswirtschaftslehre üblichen Unterscheidung und Zusammenfassung auf Mikro-, Makro und Mesoebenen. Die Makrologistik umfasst Logistiksysteme gesamtwirtschaftlicher Art. Es stehen übergeordnete bspw. verkehrstechnische und -harmonisierende Aspekte auf nationaler und internationaler Ebene im Fokus. Die Mikrologistik bildet Logistiksysteme einzelwirtschaftlicher Art ab. Mikrologistische Systeme sind intraorganisatorische Systeme innerhalb der rechtlichen Grenzen einer einzelnen Organisation. Die Mikrologistik lässt sich gemäß Abbildung 4 nach Organisationsarten mit unterschiedlichen Zielsetzungen sowie dem Unternehmens- respektive Betriebszweck weiter differenzieren. Die Mesologistik dient als Betrachtungsebene zwischen Makro- und Mikrologistik. Mesologistische Systeme sind interorganisatorische Systeme, die

⁷³ Vgl. Ruhl et al. (2018): Baulogistikplanung, S. 6

⁷⁴ Plowman (1964): Elements of Business Logistics

⁷⁵ Vgl. Hausladen (2014): IT-gestützte Logistik, S. 4

⁷⁶ Vgl. Günthner/Zimmermann (2008): Logistik in der Bauwirtschaft, S. 11

⁷⁷ Vgl. Pfohl (2018): Logistiksysteme, S. 14

⁷⁸ In Anlehnung an Pfohl (2018): Logistiksysteme, S. 15

eine Kooperation zwischen mehreren Organisationen oder Funktionen über die rechtlichen Grenzen der Einzelorganisationen hinaus beinhalten. Eine Unterscheidung der Mesologistik ist entsprechend Abbildung 4 durch die Ausprägung und die Beteiligten der Kooperation möglich.⁷⁹ Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt durch die Beschäftigung mit dem unternehmensübergreifenden Supply-Chain-Management im Bauwesen auf einem mesologistischen System.

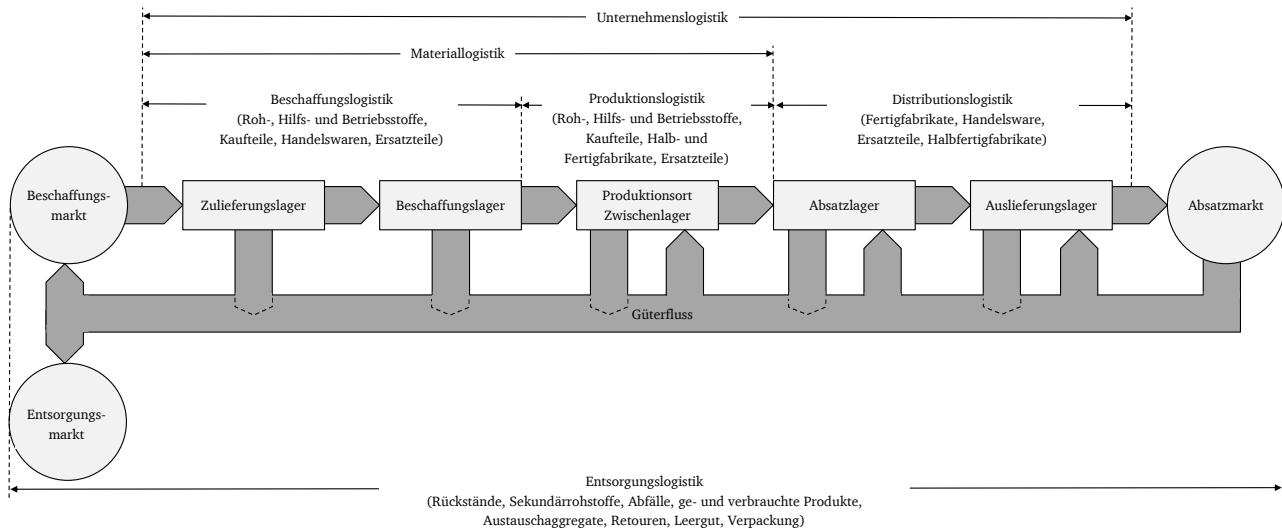


Abbildung 5: Funktionelle Abgrenzung von Logistiksystemen⁸⁰

Eine funktionelle Abgrenzung von Logistiksystemen ist durch die Phasen des Güterflusses möglich. Es entstehen phasenspezifische Subsysteme. Die erste Phase ist die Beschaffungslogistik und beinhaltet den Güterfluss vom Beschaffungsmarkt zum Produktionsort. Die in Abbildung 5 dargestellte Zwischenlagerung in einem Zulieferungslager ist möglich, aber nicht zwingend erforderlich. Die zweite Phase, die Produktionslogistik, beschreibt zum einen den Güterfluss der Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe sowie der gelieferten Ersatzteile und Kaufteile vom Beschaffungslager zum Produktionsprozess sowie zum anderen den Güterfluss der produzierten Fertigfabrikate, Halbfertigfabrikate und Ersatzteile vom Produktionsprozess zum Absatzlager. Die erste und zweite Phase kann als Materiallogistik zusammengefasst werden. Die Distributionslogistik stellt die dritte Phase dar und beinhaltet den Güterfluss der produzierten Güter vom Absatzlager zum Kunden, dem Absatzmarkt. Die dargestellte Zwischenlagerung in einem Auslieferungs- oder Absatzlager ist wie bei der Beschaffungslogistik fakultativ. Eine direkte Belieferung aus dem Produktionsprozess heraus zum Kunden ist möglich. In der vierten Phase, der Entsorgungslogistik, werden Sekundärrohstoffe und Abfälle, die im Laufe der ersten drei Phasen entstehen, entsorgt respektive einer Wiederverwendung, Wei-

⁷⁹ Vgl. Pfohl (2018): Logistiksysteme, S. 14 ff.

⁸⁰ In Anlehnung an Pfohl (2018): Logistiksysteme, S. 19

terverwendung oder Weiterverwertung zugeführt. Die Entsorgungslogistik ist dem eigentlichen Güterfluss entgegengesetzt. Abbildung 5 zeigt die phasenspezifischen Subsysteme eines Industrieunternehmens. Bei der Betrachtung eines Handelsunternehmens entfällt die Produktionslogistik und der Güterfluss besteht aus Handelswaren und Betriebsstoffen. Bei Dienstleistungsunternehmen existiert nur eine Beschaffungslogistik und der Güterfluss besteht ausschließlich aus Betriebsstoffen.

Eine weitere mögliche Abgrenzung von Logistiksystemen besteht in der Bildung von verrichtungsspezifischen Subsystemen. Diese Subsysteme sind betriebswirtschaftlich geprägt und für die Betrachtung von Logistikkosten und Logistikleistungen von Relevanz. Auf Grund der untergeordneten Bedeutung für die vorliegende Arbeit wird auf die verrichtungsspezifischen Subsysteme der Logistik, wie bspw. die Produktion, den Einkauf oder das Personalwesen, nicht näher eingegangen.⁸¹

Durch die Art und die Anzahl der in den Logistiksystemen betrachteten Beteiligten, Institutionen und Funktionen ergibt sich die Notwendigkeit der Organisation und Koordination der Logistik. Die Ausprägungen und Anforderungen an diese Organisations- und Koordinationsformen werden im folgenden Kapitel 2.1.2 behandelt.

⁸¹ Vgl. Pfohl (2018): Logistiksysteme, S. 16 ff.

2.1.2 Organisations- und Koordinationsformen der Logistik

Die Prozesse in den einzelnen Unternehmen und Logistiksystemen werden durch externe Aufträge ausgelöst und führen im weiteren Verlauf zu internen Aufträgen, die wiederum Prozesse in den einzelnen Bereichen des Unternehmens anstoßen.⁸² Hierdurch entsteht eine Aufgliederung der Aufgaben und die Potenziale einer Arbeitsteilung und Spezialisierung können genutzt werden. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit einer Organisation, die in die Bereiche Aufbau- und Ablauforganisation unterteilt werden kann.⁸³

Innerhalb der Aufbauorganisation werden die Funktionen, die Aufgaben und die Weisungsabhängigkeiten der einzelnen Leistungsstellen im Unternehmen festgelegt und somit die Organisationsstruktur bestimmt. Innerhalb der Ablauforganisation werden der Durchlauf von Daten, Informationen und weiterer Werte sowie der Ablauf der Auftragsbearbeitung festgelegt und somit der Prozessablauf bestimmt.⁸⁴ Die Aufbau- und Ablauforganisation ist nicht nur intraorganisational sondern durch die Betrachtung der Supply-Chain auch interorganisational von Relevanz.⁸⁵

Die Organisation von größeren Leistungssystemen und komplexen Logistiksystemen wird durch drei hierarchische Organisationsebenen charakterisiert. Es ergeben sich eine administrative respektive strategische, eine dispositive respektive taktische sowie eine operative Ebene.⁸⁶ Die einzelnen Aufgaben und Merkmale der jeweiligen Organisationsebenen können GUDEHUS⁸⁷ entnommen werden.

Neben dem Aufbau der Organisation in verschiedene Organisationsebenen sind Unterschiede im Grad der Zentralisierung respektive Dezentralisierung der Logistikorganisationen innerhalb von Unternehmen festzustellen. Hierbei ist eine Entwicklung zu einer wachsenden Zentralisierung und Aufgabenkonzentration in der Logistik festzustellen. Durch die Standardisierung von Prozessen und Methoden sowie dem spezialisierten logistischen Wissen in zentralen Logistikeinheiten entstehen Synergieeffekte, Produktivitätsverbesserungen und Servicevorteile. Außerdem können Zielkonflikte zwischen konkurrierenden logistischen Teilfunktionen vermieden werden.⁸⁸ In dezentralen Organisationsstrukturen der Logistik entstehen neben den Zielkonflikten zwischen und innerhalb den Organisationseinheiten auch Kommunikati-

⁸² Vgl. Gudehus (2010): Logistik, S. 44 f.

⁸³ Vgl. Pfohl (2016): Logistikmanagement, S. 281 f.

⁸⁴ Vgl. Gudehus (2010): Logistik, S. 48

⁸⁵ Vgl. Pfohl (2018): Logistiksysteme, S. 260

⁸⁶ Vgl. Gudehus (2010): Logistik, S. 48

⁸⁷ Vgl. Gudehus (2010): Logistik, S. 49

⁸⁸ Vgl. Krieger (2012): Aufbauorganisation, S. 15 f.

onsprobleme. Diesen Kommunikationsproblemen ist mit entsprechenden Koordinationsinstrumenten zu begegnen, die im späteren Verlauf dieses Kapitels thematisiert werden.⁸⁹ Bei einer Konzentration der logistischen Aufgaben und somit einem hohen Zentralisierungsgrad nimmt der Koordinationsaufwand ab. Lediglich bei kleineren Unternehmen kann eine Dezentralisation ohne organisatorische Integration der Logistik in Verbindung mit umfangreichen Koordinationsinstrumenten zielführend sein.⁹⁰ Weitere Argumente für eine Zentralisation der Logistik können u. a. PFOHL⁹¹ entnommen werden.

Die einzelnen Aufbauorganisationstypen stehen in Wechselwirkung mit der Gesamtorganisation des Unternehmens. Es sind prinzipiell funktionsorientierte (Funktionale Organisation), objektorientierte (Spartenorganisation) und prozessorientierte Organisationen zu unterscheiden.⁹²

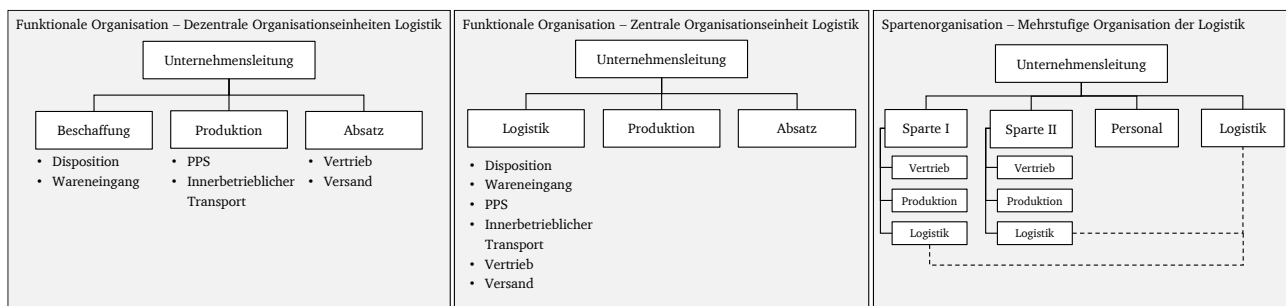


Abbildung 6: Eingliederung der Logistik in die Organisationsstruktur eines Unternehmens⁹³

Bei der funktionalen und dezentralen Eingliederung der Logistik in die Organisationsstruktur des Unternehmens bleiben die logistischen Aufgaben organisatorisch auf unterschiedlichen Funktionsbereichen aufgeteilt (s. Abbildung 6 – links).⁹⁴

Bei der funktionalen und zentralen Eingliederung der Logistik in die Organisationsstruktur des Unternehmens werden die logistischen Aufgaben in einen Funktionsbereich zusammengeführt. Hierbei können die Logistikaufgaben in einen selbstständigen logistischen Funktionsbereich zusammengefasst (s. Abbildung 6 – mittig) oder in einen bestehenden Funktionsbereich als Ganzes integriert werden.⁹⁵

Auch bei der Eingliederung der Logistik in eine Spartenorganisation ist der Zentralisierungsgrad von Relevanz. Bei Spartenorganisationen ist die Einrichtung einer rein zentralen Logistik außerhalb der Sparten nicht praxisrelevant und -tauglich. Dies ist damit zu begründen,

⁸⁹ Vgl. Pfohl (2018): Logistiksysteme, S. 262 f.

⁹⁰ Vgl. Pfohl (2016): Logistikmanagement, S. 284

⁹¹ Vgl. Pfohl (2016): Logistikmanagement, S. 294

⁹² Vgl. Krieger (2012): Aufbauorganisation, S. 16

⁹³ In Anlehnung an Krieger (2012): Aufbauorganisation, S. 16 f.

⁹⁴ Vgl. Pfohl (2018): Logistiksysteme, S. 266

⁹⁵ Vgl. Pfohl (2018): Logistiksysteme, S. 267

dass der Vorteil der Synergieeffekte durch die Zentralisierung auf Grund der fehlenden Flexibilität konterkariert wird. Ebenso führt eine rein dezentrale Logistik zwar zu einer hohen Flexibilität, Synergieeffekte können aber kaum genutzt werden.⁹⁶ Aus diesen Überlegungen heraus resultiert die dargestellte mehrstufige Organisation der Logistik innerhalb von Spartenorganisationen (s. Abbildung 6 – rechts). Bei der Spartenorganisation mit mehrstufiger Organisation der Logistik, auch als divisionale Organisationsstruktur bezeichnet, werden Aufgaben der Planung, der Koordination und der Kontrolle zentralisiert. Die operativen Aufgaben und die Steuerung der Logistik werden dezentral innerhalb der einzelnen Sparten durchgeführt. In der Praxis sind verschiedene Formen der divisionalen Organisationsstruktur erkennbar. Die Ausprägung ist dabei abhängig von der Aufteilung der Kompetenzen zwischen zentraler und dezentraler Logistikeinheit.⁹⁷ Für eine ausführliche Diskussion zu den vielfältigen konkreten Ausprägungen dieser Organisationsstruktur in der Praxis wird auf PFOHL⁹⁸ verwiesen.

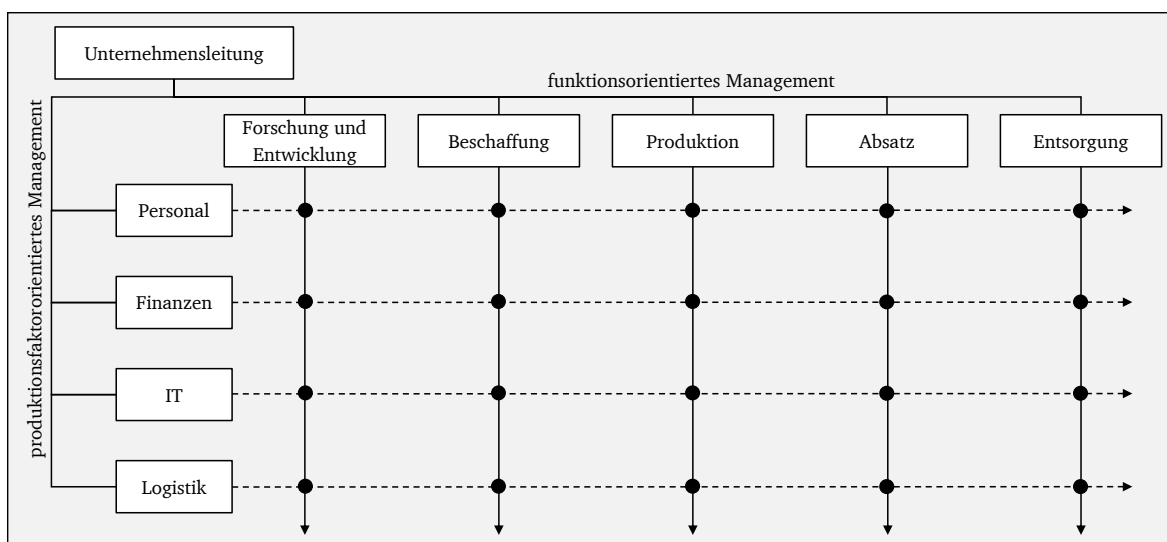


Abbildung 7: Eingliederung der Logistik in eine Matrixorganisation eines Unternehmens⁹⁹

Sowohl die funktionsorientierte als auch die spartenorientierte Logistikorganisation stößt bei kundenorientierten Prozessen an ihre Grenzen. Abhilfe schafft hier eine prozessorientierte Aufbauorganisation. Die Herausforderung besteht hierbei darin, die notwendigen Qualifikationen der Mitarbeitenden unabhängig ihrer organisationalen Zuordnung in die jeweiligen Prozessketten zu integrieren. Eine solche prozessorientierte Aufbauorganisation wird zunächst als Matrix dargestellt, die sowohl die funktionale als auch die prozessbezogene Verantwortung abbildet. In Abbildung 7 ist beispielhaft eine funktions- und produktionsfaktororientierte Matrixorganisation gezeigt. Endgültiges Ziel ist die Darstellung einer reinen

⁹⁶ Vgl. Krieger (2012): Aufbauorganisation, S. 17

⁹⁷ Vgl. Pfohl (2018): Logistiksysteme, S. 273

⁹⁸ Vgl. Pfohl (2018): Logistiksysteme, S. 273 ff.

⁹⁹ In Anlehnung an Pfohl (2018): Logistiksysteme, S. 284

Prozessorganisation ohne aber eine hierarchische Struktur und damit verbunden einen organisatorischen Führungsrahmen vollständig aufzugeben.¹⁰⁰ Der Prozess dominiert somit die Struktur und nicht umgekehrt. Dies führt, abgeleitet aus dem Gesamtprozess, zu abgegrenzten sowie aneinandergereihten Prozessmodulen und ermöglicht eine hohe Kundenorientierung des Gesamtunternehmens.¹⁰¹

Die derzeitige Entwicklung der logistischen Aufbauorganisationen ist geprägt durch die Nutzung von innovativen Informations- und Kommunikationssystemen sowie einer Kollaboration der klassisch arbeitsteilig agierenden Unternehmensorganisationen. Diese Entwicklungen gehen einher mit einer Automatisierung von Ausführungsprozessen, einer Verflachung der Hierarchien sowie einer Zentralisierung von logistischen Spezialressourcen und einem Arbeiten in interdisziplinären Teams innerhalb einer Supply-Chain. Es wird an dieser Stelle nochmals herausgestellt, dass auch aus organisationalen Aspekten unternehmensübergreifende Logistikketten und Netzwerke anzustreben sind und diese Supply-Chains zentral durch innovative Informations- und Kommunikationssysteme zu steuern und zu disponieren sind.^{102, 103}

Im Zuge der prozess- und funktionsübergreifenden Zusammenarbeit kommt der Koordination und Abstimmung der logistischen Prozesse sowie der Planung von Logistiksystemen eine hohe Bedeutung zu.¹⁰⁴ Ebenso erfordert das Supply-Chain-Management eine unternehmensübergreifende Koordination.¹⁰⁵ Koordination bezeichnet als Folge der Arbeitsteilung die Ordnung und Abstimmung der Handlungen von Individuen und Kollektiven. Die Koordination folgt dabei inhaltlichen Erfordernissen und schafft eine zeitliche und räumliche Ordnung und Abstimmung der Handlungen.¹⁰⁶ Es ergibt sich in der Logistik daher ein inhaltlicher, zeitlicher und räumlicher Koordinierungsbedarf.¹⁰⁷

Innerhalb eines einzelnen Arbeitsprozesses definiert die Ablauforganisation Regeln, um die zweckorientierte und aufeinander abgestimmte Ausführung der einzelnen Prozesse zu ermöglichen. Hierdurch entsteht eine im Voraus festgelegte Ordnung und Anleitung für die logistischen Prozesse, die zu einer Koordination der Abläufe führen.¹⁰⁸ Bei der Ablauforganisation sind verschiedene Handlungsfolgen zu unterscheiden. Eine detaillierte Darstellung der

¹⁰⁰ Vgl. Krieger (2012): Aufbauorganisation, S. 17 f.

¹⁰¹ Vgl. Pfohl (2016): Logistikmanagement, S. 289 f.

¹⁰² Vgl. Krieger (2012): Aufbauorganisation, S. 18 f.

¹⁰³ Vgl. Gudehus (2010): Logistik, S. 64 f.

¹⁰⁴ Vgl. Krieger (2012): Aufbauorganisation, S. 18

¹⁰⁵ Vgl. Pfohl (2016): Logistikmanagement, S. 297

¹⁰⁶ Vgl. Large (2016): Logistikmanagement, S. 39 f.

¹⁰⁷ Vgl. Large (2016): Logistikmanagement, S. 46 f.

¹⁰⁸ Vgl. Large (2016): Logistikmanagement, S. 156

fünf Handlungsfolgen – freier Verlauf, inhaltlich gebundener Verlauf, Abfolge gebundener Verlauf, zeitlich gebundener Verlauf und taktmäßig gebundener Verlauf liefert LARGE¹⁰⁹.

Neben der Koordination innerhalb einzelner logistischer Teilfunktionen und Prozesse entsteht in der Logistik auch ein Koordinierungsbedarf bei mehreren logistischen Teilfunktionen untereinander, bei logistischen Handlungen mit anderen betrieblichen Funktionen sowie bei unternehmensübergreifenden logistischen Handlungen.¹¹⁰ Es entstehen Schnittstellen erster Ordnung in Form von unternehmensinternen Schnittstellen der verrichtungsorientierten Subsysteme der Logistik, Schnittstellen zweiter Ordnung in Form von unternehmensinternen Schnittstellen der phasenorientierten Subsysteme der Logistik sowie Schnittstellen dritter Ordnung in Form von unternehmensübergreifenden respektive interorganisatorischen Schnittstellen, die zu koordinieren sind.¹¹¹

Da dieser Koordinierungsbedarf nicht alleine durch eine Ablauforganisation gedeckt werden kann, stehen verschiedene Koordinierungsinstrumente zur Verfügung. Eine Koordination ist möglich durch persönliche Weisungen, durch Selbstabstimmungen oder durch Standardisierungen in Form von Programmen und Plänen sowie durch die Unternehmenskultur.¹¹² Weitere Informationen zu den einzelnen Koordinierungsinstrumenten innerhalb der Logistik können u. a. PFOHL¹¹³ und LARGE¹¹⁴ entnommen werden.

An dieser Stelle wird herausgestellt, dass durch die Betrachtungen der Supply-Chain die Zahl der Schnittstellen dritter Ordnung steigt und ein kooperatives Verhalten der Beteiligten vorausgesetzt wird. Dies führt zu einer verbesserten Koordination.¹¹⁵ Die verschiedenen Ausprägungen von interorganisatorischen Kooperationen sowie Ausführungen zur Kooperationsbereitschaft können PFOHL¹¹⁶ entnommen werden. Durch ein hohes Kooperationsausmaß über Bereichs- und Unternehmensgrenzen hinweg sollen sich in allen drei Schnittstellenordnungen Schnittstellen zu aufeinander abgestimmten Nahtstellen entwickeln.¹¹⁷ Die im Zuge der Organisation angesprochenen innovativen Informations- und Kommunikationssysteme sind selbsterklärend auch im Kontext der Koordination zu empfehlen.¹¹⁸

¹⁰⁹ Vgl. Large (2016): Logistikmanagement, S. 157

¹¹⁰ Vgl. Large (2016): Logistikmanagement, S. 48

¹¹¹ Vgl. Pfohl (2018): Logistiksysteme, S. 321 ff.

¹¹² Vgl. Schulte-Zurhausen (2014): Organisation, S. 236 ff.

¹¹³ Vgl. Pfohl (2018): Logistiksysteme, S. 263 f.

¹¹⁴ Vgl. Large (2016): Logistikmanagement, S. 41 f.

¹¹⁵ Vgl. Pfohl (2018): Logistiksysteme, S. 327

¹¹⁶ Vgl. Pfohl (2018): Logistiksysteme, S. 326 ff.

¹¹⁷ Vgl. Pfohl (2018): Logistiksysteme, S. 337

¹¹⁸ Vgl. Krieger (2012): Aufbauorganisation, S. 18

2.1.3 Logistikketten

Die Produktionsprozesse der verschiedenen Industriezweige ermöglichen eine Güterbereitstellung für die Konsumenten und anschließend eine Güterverwendung seitens der Konsumenten. Durch eine Güterverteilung sind deren Bereitstellung und Verwendung miteinander verbunden. Die Güterverteilung erfolgt durch Transformationsprozesse in Form von Lager- und Bewegungsprozessen, die die Güter raumzeitlich verändern. Die raumzeitliche Transformation wird durch Logistiksysteme und darin ablaufende Logistikprozesse charakterisiert. Die Logistikprozesse sind somit verantwortlich für den Güterfluss und verbinden die Güterbereitstellung und die Güterverwendung.¹¹⁹

Logistiksysteme zeichnen sich durch ein Ineinandergreifen der Bewegungs- und Lagerprozesse aus und lassen sich durch Netzwerke darstellen. Innerhalb dieser Netzwerke werden Objekte respektive Güter an Knoten gespeichert und gelagert sowie entlang von Kanten bewegt. Die einzelnen Knoten des Logistiknetzwerkes sind über Kanten miteinander verbunden. Jede Kante des Logistiknetzwerkes entspricht dabei einer Möglichkeit, wie die Objekte respektive die Güter durch das Netzwerk bewegt werden können.^{120, 121}

Der durch die Netzwerke dargestellte Güterfluss kann, wie in Abbildung 8 dargestellt, mittels einstufigen, mehrstufigen oder kombinierten Logistiksystemen realisiert werden.

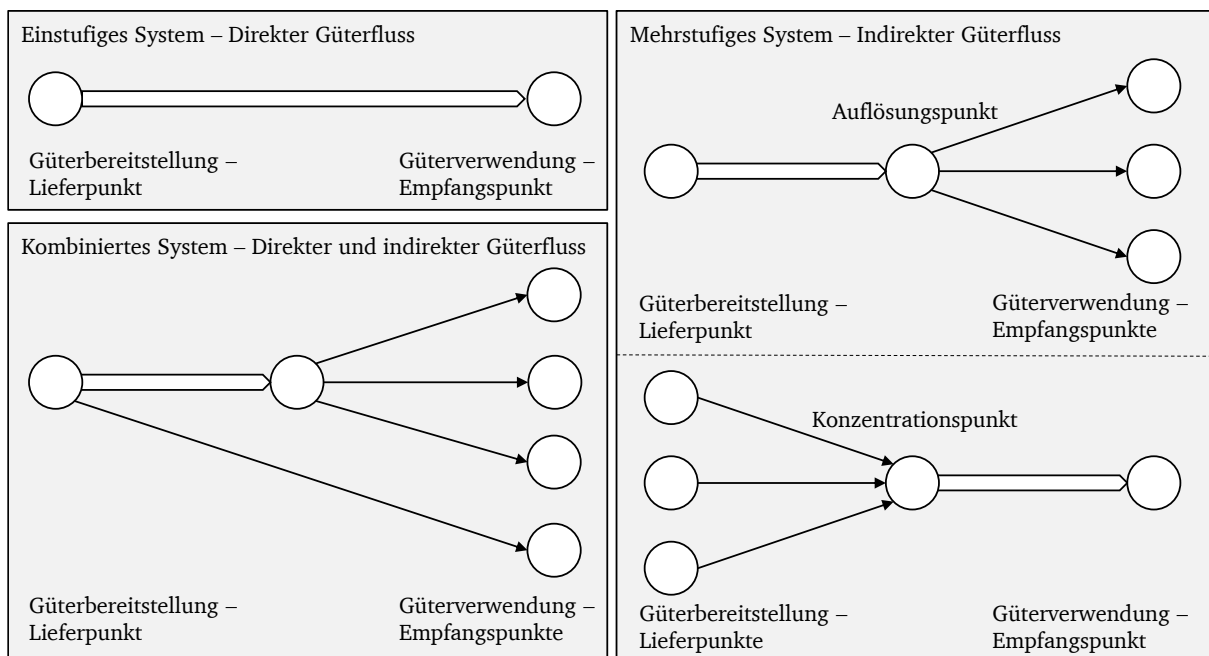


Abbildung 8: Grundstrukturen von Logistiksystemen¹²²

¹¹⁹ Vgl. Pfohl (2018): Logistiksysteme, S. 3 f.

¹²⁰ Vgl. Ballou (2004): Business Logistics/ Supply Chain Management, S. 41 f.

¹²¹ Vgl. Pfohl (2018): Logistiksysteme, S. 5

¹²² In Anlehnung an Pfohl (2018): Logistiksysteme, S. 6

Bei einem einstufigen Logistiksystem findet der Güterfluss direkt und somit nicht unterbrochen statt. Zwischen der Güterbereitstellung, der Quelle der Güter und der Güterverwendung, der Senke der Güter entstehen keine zusätzlichen Logistikprozesse in Form von Bewegungs- oder Lagerprozessen.¹²³ Eine Quelle kann dabei mehrere Senken beliefern und vice versa kann eine Senke von mehreren Quellen beliefert werden.¹²⁴

Bei einem mehrstufigen Logistiksystem wird der Güterfluss unterbrochen und erfolgt somit indirekt. Zwischen der Güterbereitstellung und der Güterverwendung werden Güter konzentriert, gebündelt oder aufgelöst und es werden zusätzliche Logistikprozesse nötig.¹²⁵ Je nach Anzahl der Knoten, bei mehrstufigen Logistiksystemen in Form von bspw. Sammel- oder Verteilstationen, zwischen Quelle und Senke kann zwischen zwei- und drei- respektive n-stufigen Netzwerken unterschieden werden.¹²⁶ Bei kombinierten Logistiksystemen ist ein direkter und indirekter Güterfluss nebeneinander möglich.¹²⁷

Die Ausprägung des Logistiksystems hat unmittelbare Auswirkungen auf die Logistikketten eines Industrieunternehmens. Die Logistikkette, die als „*Folge von Ereignissen, die Umwandlung, Bewegung oder Anordnung enthalten können und Mehrwert schaffen*“¹²⁸ definiert ist, stellt den gesamten Güterfluss vom Lieferanten zum Unternehmen, innerhalb des Unternehmens sowie abschließend zum Kunden dar und ist durch die Reihenfolge der Transport-, Lager- und Produktionsprozesse geprägt. An den Schnittstellen dieser Prozesse sind Umschlagprozesse nötig. Durch Transportprozesse wird der Güterfluss zum Unternehmen hin sowie vom Unternehmen weg bestimmt. Die Produktionsprozesse beeinflussen den Güterfluss im Unternehmen. Auf Grund der engen Verzahnung mit den logistischen Prozessen und der ganzheitlichen Sichtweise der Logistik ist es zweckmäßig, auch die Produktionsprozesse in der Logistikkette zu berücksichtigen. Die Produktionsplanung und -steuerung des Unternehmens sollte daher ein Teil der Logistik sein.¹²⁹ Eine Abgrenzung des Begriffs „Logistikkette“ und damit in Verbindung stehender Begriffe wie bspw. „Supply-Chain“, „Wertschöpfungskette“ oder „Lieferkette“ erfolgt im Kontext der Ausführungen zum Supply-Chain-Management in Kapitel 3.1.1.

¹²³ Vgl. Pfohl (2018): Logistiksysteme, S. 5

¹²⁴ Vgl. Gudehus (2010): Logistik, S. 17

¹²⁵ Vgl. Pfohl (2018): Logistiksysteme, S. 6

¹²⁶ Vgl. Gudehus (2010): Logistik, S. 18

¹²⁷ Vgl. Pfohl (2018): Logistiksysteme, S. 7

¹²⁸ DIN EN 14943 (2006): Transportdienstleistungen – Logistik – Glossar, S. 123

¹²⁹ Vgl. Fleischmann (2018): Begriffliche Grundlagen der Logistik, S. 5

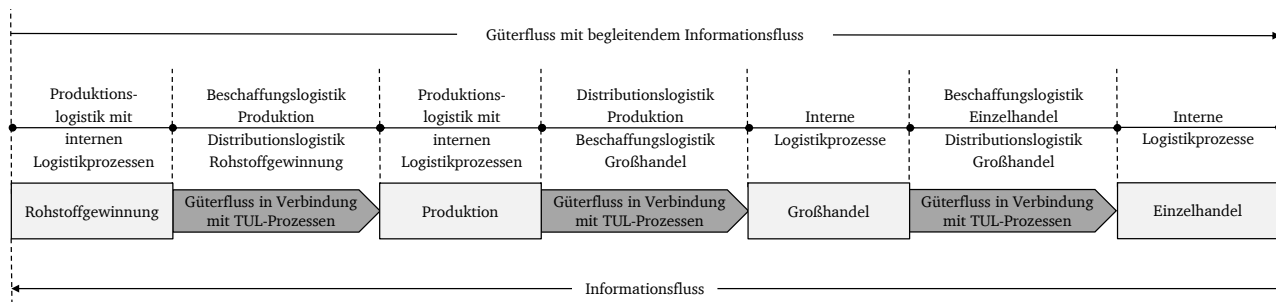


Abbildung 9: Exemplarische Logistikkette¹³⁰

Abbildung 9 zeigt eine mögliche Logistikkette und verdeutlicht die unterschiedlichen Akteure innerhalb einer Logistikkette sowie den damit verbundenen Güterfluss. Der Güterfluss und die Logistikkette sind hierbei eng mit der funktionellen Abgrenzung der logistischen phasen-spezifischen Subsysteme verknüpft. Entlang der Logistikkette werden die Güter verändert oder bearbeitet und erfahren somit eine stufenweise Wertschöpfung.¹³¹ Der Güterfluss wird dabei durch vorausgehende Informationen ausgelöst sowie durch erklärende Informationen begleitet. Ferner folgen die Informationen dem Güterfluss bestätigend oder nicht bestätigend nach.¹³² Im Zuge der Beschaffungs- und Distributionslogistik kommt dem direkten und indirekten Güterfluss eine hohe Bedeutung zu. Für die vorliegende Arbeit haben die zusätzlichen Knoten in Form von bspw. Sammel- und Verteilstationen bei kombinierten und mehrstufigen Logistiksystemen eine besondere Relevanz. Die verschiedenen Ausprägungen sowie Funktionen, Prozesse und Effekte in Verbindung mit diesen zusätzlichen Knoten werden in Kapitel 3.2.1 thematisiert.

Die Darstellung der logistischen Prozesse als Kette ist eine Abstraktion der in der Praxis vorzufindenden Netzwerk-Strukturen. In der Praxis existieren zwischen einem Lieferanten Verbindungen zu mehreren Produzenten und dem folgend zwischen einem Produzenten auch Verbindungen zu mehreren Lieferanten. Der gleiche Zusammenhang besteht bei den weiteren Lieferanten-Kunden-Beziehungen.¹³³

¹³⁰ Eigene Darstellung

¹³¹ Vgl. Koether (2014): Distributionslogistik, S. 11

¹³² Vgl. Pfohl (2018): Logistiksysteme, S. 8

¹³³ Vgl. Fleischmann (2018): Begriffliche Grundlagen der Logistik, S. 4

2.2 Baulogistik

Im folgenden Unterkapitel werden die Grundlagen zur Baulogistik thematisiert. Nach der Darstellung der verschiedenen Begriffsdefinitionen und den Entwicklungen der Baulogistik sowie den möglichen Organisations- und Koordinationsformen der Baulogistik wird der Stand der Forschung im Bereich der Baulogistik abgebildet. Da der Begriff der Baulogistik normativ nicht definiert und geregelt ist, erfolgt die Darstellung der verschiedenen Begriffsdefinitionen auf Basis der in der Fachliteratur zu findenden Definitionen. Abschließend wird das Baulogistikprozessmodell von RUHL vorgestellt.

2.2.1 Begriffsdefinitionen und Entwicklungen der Baulogistik

Prozessorientierte Ansätze im Kontext eines Prozessdenkens im Bauwesen überführen die komplexen Strukturen, die während des gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks vorhanden sind, in definierte Input-Output-Beziehungen. Hierbei wandelt der Prozess die definierte Input-Struktur durch Einzeltätigkeiten, Tätigkeitsfolgen oder andere Transformationsvorgänge in eine definierte Output-Struktur um.¹³⁴

Ein wesentlicher Transformationsvorgang ist der Transfer von großen Mengen an Daten, Informationen, Baustoffen, Betriebsmitteln, Finanzmitteln sowie Personen und weiteren projektspezifischen Größen im Zuge der Planung und Realisierung von Bauprojekten sowie dem Betrieb und der Veränderung einschließlich des Abbruchs von Bauobjekten. Dieser Transfer ist für die effiziente und sichere Durchführung von Bauvorhaben von erheblicher Relevanz und ein maßgeblicher Erfolgsfaktor. Eine entsprechende Würdigung erfährt dieser Transfer im Bauwesen in Form einer Initiierung, Planung, Organisation sowie Realisierung der Bau-logistik. Hierdurch kann der Anforderung nach einer strukturierten und möglichst standardisierten Gestaltung der projektrelevanten Transfers entlang der Prozesskette Bauwerksentwurf – Bauwerksplanung – Bauproduktionsplanung – Bauausführung – Bauwerksbetrieb entsprochen werden. Die Baulogistik sollte hierbei sowohl als Basiselement in der Planungsphase als auch als Querschnittsfunktion während der gesamten Realisierungsphase eines Bauprojekts beachtet werden. Die Baulogistik stellt dabei einen Supportprozess dar, der substantiell in die Kernprozesse eingreift.^{135, 136}

Die Baulogistik stellt eine branchenspezifische Adaption der grundständigen Logistik dar und ist nicht einheitlich definiert. Die definitorische Vielfalt beruht zum einen auf der stetigen Weiterentwicklung der Baulogistik an sich als auch auf der Sichtweise und dem Betrachtungszeitraum, welche der jeweiligen Definition zu Grunde liegt. Der definitorischen Vielfalt

¹³⁴ Vgl. Motzko et al. (2013): Grundlagen des Bauprozessmanagements, S. 3 ff.

¹³⁵ Vgl. Motzko (2020): Baulogistik, S. 593 ff.

¹³⁶ Vgl. Ruhl et al. (2018): Bau-logistikplanung, S. 1

gemein ist eine fehlende Berücksichtigung der Baulogistik in den einzelnen Planungsphasen und -prozessen.

RUHL begegnet dieser fehlenden Berücksichtigung und liefert auf Grundlage der Definition von SCHMIDT¹³⁷ folgende Begriffsdefinition zur Baulogistik:

*„Baulogistik ist ausgehend von der Flussanalyse/-prognose der erforderlichen Transporte für den Produktionsprozess die Initiierung, Planung, Integration und Ausführung der erforderlichen Leistungen für die Ver- und Entsorgung der Baustelle und gleichzeitig der Rahmen der Produktionsbedingungen (Baustellenlogistik). Dabei berücksichtigt die Baulogistik in der Regel neben dem Hauptattribut Transport die weiteren Attribute Flächen- und Containermanagement, Entsorgung, Medien, Sicherheit/Schutz und Geräte. Die übergeordnete Informationslogistik durch die Baustelleninformation und zentralisierte Organisation vervollständigt diesen Rahmen. Ferner kann es zur projektbezogenen Ergänzung der Betrachtung weiterer Produktionsbedingungen im Rahmen der Baulogistik als Supply-Chain-Management kommen.“*¹³⁸ Das Prozessmodell der Baulogistik, das auf dieser Definition aufbaut, wird in Kapitel 2.2.4 erläutert.

Analog zur grundständigen Logistik können auch die Ursprünge sowie die Beachtung von baulogistischen Aspekten historisch verortet werden. Ein Beispiel für die Auseinandersetzung mit logistischen Herausforderungen im Kontext von Bautätigkeiten stellt der Bau von Pyramiden¹³⁹ dar. Im Folgenden wird anhand der Entwicklungsstufen der grundständigen Logistik die definitorische Entwicklung der Baulogistik dargestellt.

Zunächst wird der Baulogistik die Aufgabe der *„Versorgung der Baustelle mit Material, Gerät und Ersatzteilen in der geforderten Qualität, in ausreichender Menge und zur rechten Zeit“*¹⁴⁰ respektive der *„Versorgung der Baustelle mit den zur Leistungserbringung benötigten Produktionsmitteln in der geforderten Qualität, in ausreichender Menge und zur rechten Zeit“*¹⁴¹ zugeordnet. Als Produktionsmittel werden neben Material, Gerät und Ersatzteilen auch Personal und Know-how definiert. Die weiteren Ausführungen fokussieren die Versorgungsfunktion der Logistik bei Auslandsbaustellen und stellen die Relevanz der Versorgungslogistik für Bauvorhaben heraus. Es werden zwar Aspekte zur Planung und zur Berücksichtigung der Logistik bereits beim Bauwerksentwurf angesprochen, die substanzielle Definition entspricht aber einer Betrachtung der Baulogistik als Versorgungsfunktion. Im Mittelpunkt dieser funktionso-

¹³⁷ Vgl. Schmidt (2003): Wettbewerbsfaktor Baulogistik, S. 182

¹³⁸ Ruhl (2016): Entwicklung eines Baulogistikprozessmodells, S. 89

¹³⁹ Vgl. Müller-Römer (2007): Pyramidenbau mit Rampen und Seilwinden – ein Beitrag zur Bautechnik im Alten Reich

¹⁴⁰ Kulick (1979): Versorgung von Auslandsbaustellen, S. 2135

¹⁴¹ Kulick (1981): Logistische Aufgaben bei der Vorbereitung und Abwicklung von Auslandsbaustellen, S. 193

rientierten und -spezifischen Definition stehen die Transport-, Umschlag- und Lagerungsprozesse innerhalb der Bauunternehmung oder eines einzelnen Funktionsbereichs.^{142, 143} Diese Betrachtung der Logistik im Bauwesen im Sinne abgeschlossener Funktionsbereiche ohne explizite Würdigung der Schnittstellen sowie der Querschnitts- und Koordinationsfunktion entspricht der ersten Entwicklungsstufe der grundständigen Logistik. Weitere Ausführungen zur Logistik im Bauwesen auf der ersten Entwicklungsstufe der grundständigen Logistik sind u. a. bei BAUER¹⁴⁴, HEIMBÜRGE¹⁴⁵, PÖRSCHMANN/GLEUE¹⁴⁶, RIESER¹⁴⁷ und SEELING^{148, 149} zu finden.

Entsprechend den Entwicklungsstufen der grundständigen Logistik wird als nächster Schritt die Logistik im Bauwesen als Querschnittsfunktion betrachtet. In verschiedenen Definitionen wird die Bedeutung der Koordination der einzelnen Projektbeteiligten, sprich die Koordinationsfunktion dargelegt sowie übergeordnete Projektziele miteinbezogen. Die Definitionen zur Logistik im Bauwesen als Querschnittsfunktion unterscheiden sich zwar im Detail, formulieren aber als entscheidendes gemeinsames Merkmal die Integration der verschiedenen Phasen und Funktionen des Materialflusses im Bauprozess zu funktionsübergreifenden Abläufen. Dies führt zu einer flussbezogenen Koordination der logistischen Prozesse. Es kann der grundständigen Logistik folgend von einer funktionsübergreifenden Querschnittsfunktion respektive flussbezogenen Koordinationsfunktion, bei der Schnittstellen zwischen den einzelnen Funktionsbereichen beachtet werden, gesprochen werden. Im Zuge dieser Entwicklung etabliert sich der Begriff Baulogistik als branchenspezifische Ausprägung der Logistik.¹⁵⁰

Die Integration der verschiedenen Phasen und Funktionen des Materialflusses im Bauprozess beruht auf der funktionellen Abgrenzung der logistischen phasenspezifischen Subsysteme, der Beschaffungs-, Produktions-, Distributions- und Entsorgungslogistik der allgemeinen Logistik. Da die Bauproduktion vor Ort realisiert wird, entfällt bei der branchenspezifischen Betrachtung die Distributionslogistik. Des Weiteren wird die Beschaffungslogistik teilweise als Versorgungslogistik sowie die Produktionslogistik als Baustellenlogistik bezeichnet. Abbildung 10 und Abbildung 11 zeigen die phasenspezifischen Subsysteme der Baulogistik.

¹⁴² Vgl. Kulick (1979): Versorgung von Auslandsbaustellen, S. 2135 ff.

¹⁴³ Vgl. Kulick (1981): Logistische Aufgaben bei der Vorbereitung und Abwicklung von Auslandsbaustellen, S. 193 ff.

¹⁴⁴ Vgl. Bauer (2007): Baubetrieb, S. 632

¹⁴⁵ Heimbürge (1990): Beitrag zur rechnergestützten Vorbereitung der baustellenbezogenen TUL-Prozesse in der Ausführungsphase von Bauvorhaben (Expertensystem TUL-Ausbau)

¹⁴⁶ Pörschmann/Gleue (1985): Transport-, Umschlag- und Lagerungsprozesse im Bauwesen

¹⁴⁷ Rieser (1996): Bauen und Logistik

¹⁴⁸ Seeling (1982): Denken Sie log(ist)isch

¹⁴⁹ Seeling (1992): Logistik in der Bauunternehmung

¹⁵⁰ Vgl. Krauß (2005): Die Baulogistik in der schlüsselfertigen Ausführung, S. 15 ff.

Ausführungen zur funktionellen Abgrenzung der branchen- und phasenspezifischen Subsysteme wurden u. a. bereits von RIESER¹⁵¹ und SEELING¹⁵² publiziert. Es ist jedoch anzumerken, dass hierbei die Aspekte der Querschnitts- und Koordinationsfunktion der Baulogistik noch nicht adäquat gewürdigt werden.

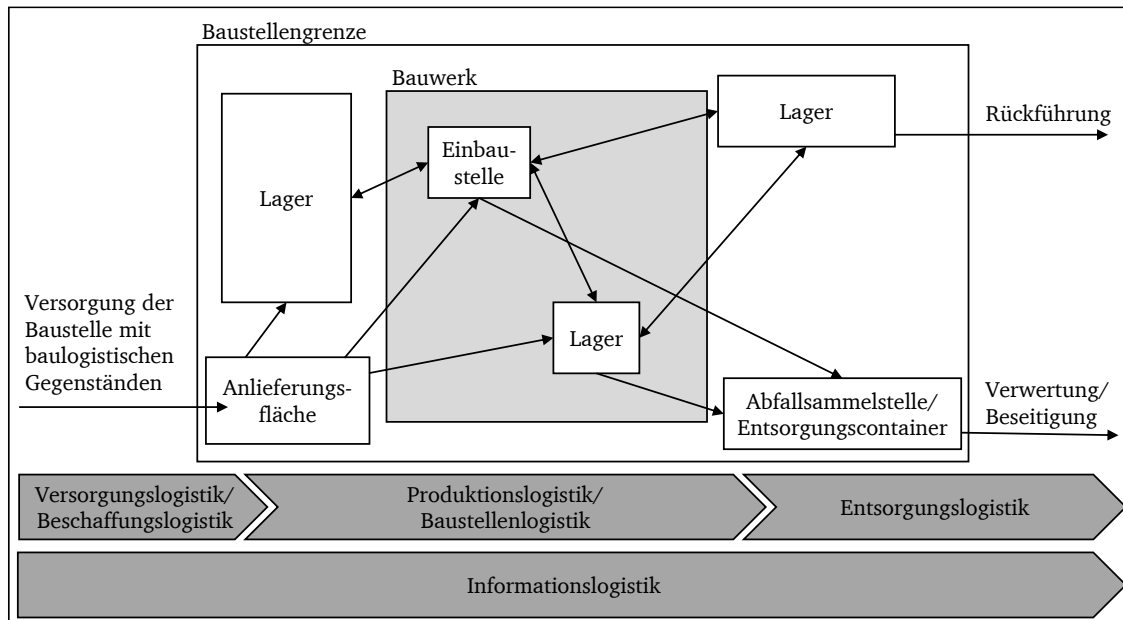


Abbildung 10: Phasenspezifische Subsysteme der Baulogistik – Grundriss¹⁵³

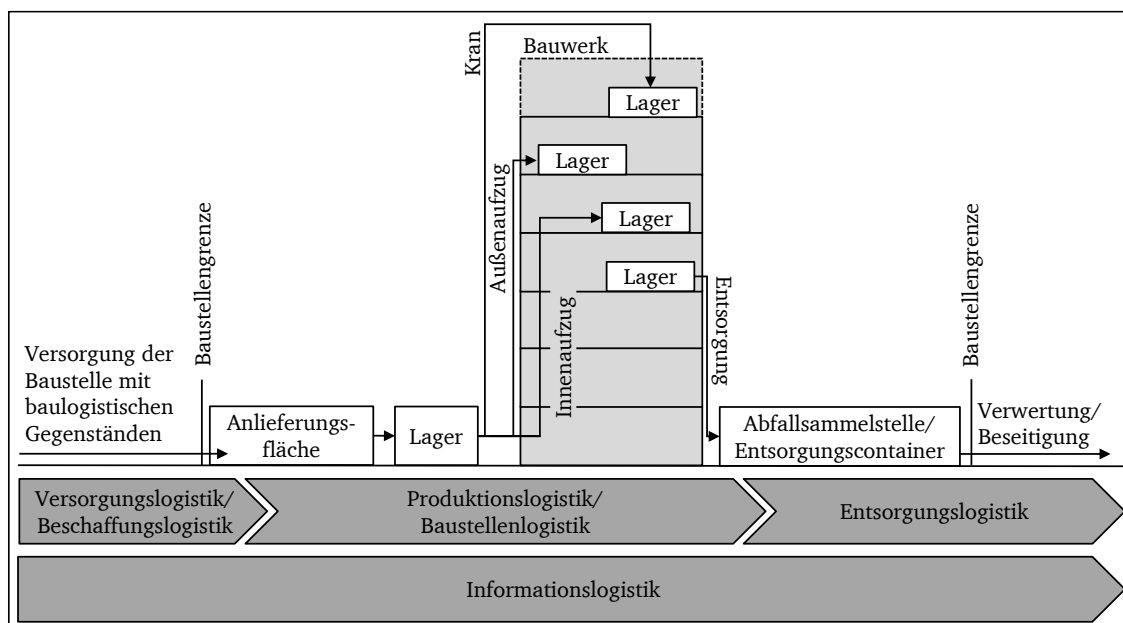


Abbildung 11: Phasenspezifische Subsysteme der Baulogistik – Schnitt¹⁵⁴

¹⁵¹ Rieser (1996): Bauen und Logistik

¹⁵² Seeling (1992): Logistik in der Bauunternehmung

¹⁵³ In Anlehnung an Krauß (2005): Die Baulogistik in der schlüsselfertigen Ausführung, S. 19

¹⁵⁴ In Anlehnung an Boenert/Blömeke (2003): Logistikkonzepte im Schlüsselfertigbau zur Erhöhung der Kostenführerschaft, S. 279

Die Beschaffungs- respektive Versorgungslogistik beinhaltet alle Prozesse zur Versorgung der Baustelle und endet mit dem Eintreffen der baulogistischen Gegenstände auf der Baustelle. Sie fungiert somit als Bindeglied zwischen Zulieferern und Produzenten, bspw. in Form von Baustoffherstellern respektive -lieferanten und der Produktionsstätte „Baustelle“. Zu den baulogistischen Gegenständen zählen die Objekte Personen, Material, Informationen sowie Arbeitsmittel (Materialfluss-, Produktions- und Informationsflussmittel) und die Infrastruktur in Form von Gebäuden, Flächen und Wegen. Die Hauptaufgaben der Beschaffungslogistik bestehen in der Bedarfsermittlung der genannten baulogistischen Gegenstände auf der Baustelle und der Ermittlung der Gesamtanzahl der erforderlichen Transporte sowie deren Analyse hinsichtlich der zeitlichen Abfolge. Des Weiteren sind Transportspitzen aufzuzeigen und zu entflechten sowie mögliche Bezugsquellen zu sondieren. Als weitere Hauptaufgaben der Beschaffungslogistik sind die Beschaffung der baulogistischen Gegenstände sowie die zeitliche und räumliche Koordination des Personen-, Material-, Informations- und Arbeitsmittelflusses zur Baustelle zu nennen. Auf Grund der erhöhten Gewerke- und daraus resultierend erhöhten Transportanzahl steigt der logistische Aufwand in den Phasen des Ausbaus im Vergleich zur Rohbauphase erheblich.^{155, 156, 157}

Der Baustellen- respektive Produktionslogistik werden alle logistischen Prozesse innerhalb des Baufeldes zugeordnet. Sie plant die Transporte (Transportkapazität der Fördermittel, Auswahl der Fördermittel, Planung der Transportketten) sowie den damit verbundenen Prozess der Lagerung und die Lagerflächen innerhalb der Baustelle und des Bauwerks. Die Planung der Fördermittel und der Lagerflächen wird im Baustelleneinrichtungsplan dargestellt und festgehalten. Die Anlieferungsflächen definieren den Übergang von der Beschaffungs- respektive Versorgungslogistik zur Baustellen- respektive Produktionslogistik.^{158, 159}

Die Entsorgungslogistik umfasst die Planung und Steuerung aller logistischen Prozesse, die im Zusammenhang mit der Beseitigung oder Verwertung von Abfällen sowie dem Abtransport von Arbeitsmitteln stehen. Die Abfälle können nach Aushub, Bauschutt, Straßenaufbruch, Baustellenabfälle und Sonderabfälle differenziert werden. Die Aufgaben und damit auch die Herausforderungen der Entsorgungslogistik entsprechen der Beschaffungs- respektive Versorgungslogistik mit dem Unterschied, dass die baulogistischen Gegenstände ab- und nicht antransportiert werden.^{160, 161}

¹⁵⁵ Vgl. Krauß (2005): Die Baulogistik in der schlüsselfertigen Ausführung, S. 18 ff.

¹⁵⁶ Vgl. Hofstadler (2007): Bauablaufplanung und Logistik im Baubetrieb, S. 42

¹⁵⁷ Vgl. Boenert/Blömeke (2003): Logistikkonzepte im Schlüsselfertigbau zur Erhöhung der Kostenführerschaft, S. 278

¹⁵⁸ Vgl. Krauß (2005): Die Baulogistik in der schlüsselfertigen Ausführung, S. 20

¹⁵⁹ Vgl. Hofstadler (2007): Bauablaufplanung und Logistik im Baubetrieb, S. 44 ff.

¹⁶⁰ Vgl. Krauß (2005): Die Baulogistik in der schlüsselfertigen Ausführung, S. 20

¹⁶¹ Vgl. Hofstadler (2007): Bauablaufplanung und Logistik im Baubetrieb, S. 46 f.

Die drei phasenspezifischen Subsysteme der Baulogistik sind durch einen vorausgehenden, begleitenden oder nachfolgenden Informationsfluss, die Informationslogistik, miteinander verbunden. Die Informationslogistik kann aber auch unabhängig von den anderen Subsystemen von Relevanz sein. Dies betrifft bspw. Informationsflüsse zur Objekt- oder Terminplanung und zur Bauausführung, die nicht unmittelbar mit den anderen Subsystemen in Verbindung stehen und sich somit mit der Information an sich beschäftigen.¹⁶²

Für eine weiterführende Darstellung zu den phasenspezifischen Subsystemen der Baulogistik wird auf HOFSTADLER¹⁶³ und BOENERT/BLÖMEKE¹⁶⁴ verwiesen. Die phasenspezifische Abgrenzung der Baulogistik in die Subsysteme Versorgungs- respektive Beschaffungslogistik, Produktions- respektive Baustellenlogistik sowie Entsorgungs- und Informationslogistik wird, neben der bereits genannten Autorenschaft, u. a. auch von GÜNTHER/ZIMMERMANN¹⁶⁵, HELMUS et al.¹⁶⁶, SCHACH/SCHUBERT¹⁶⁷ und ZIMMERMANN/HAAS¹⁶⁸ vorgenommen. Einige Veröffentlichungen stellen die Informationslogistik dabei nicht als eigenes Subsystem dar. In diesen Fällen wird davon ausgegangen, dass die betrachteten Informationen immer in Verbindung zu den anderen baulogistischen Gegenständen stehen und deren Transferbewegungen nicht von alleine realisiert werden, sondern stets an die vorausgehende, begleitende oder nachfolgende Informationsübermittlung gebunden ist.¹⁶⁹ Eine gesonderte Betrachtung der Informationslogistik scheint dennoch sinnvoll um die Relevanz des Informationsflusses herauszustellen. Außerdem können hierdurch auch Informationsflüsse innerhalb der logistischen Betrachtung berücksichtigt werden, die nicht unmittelbar mit den Transferbewegungen der baulogistischen Gegenstände in Verbindung stehen.¹⁷⁰

Trotz der in Details erkennbaren Unterschiede bei den Definitionen zur Baulogistik der o. g. Autorenschaft, kann festgehalten werden, dass die Versorgung der Baustelle weiterhin im Fokus steht und die Baulogistik als Querschnittsfunktion an Bedeutung gewinnt. Die phasen-

¹⁶² Vgl. Krauß (2005): Die Baulogistik in der schlüsselfertigen Ausführung, S. 20

¹⁶³ Vgl. Hofstadler (2007): Bauablaufplanung und Logistik im Baubetrieb, S. 42 ff.

¹⁶⁴ Vgl. Boenert/Blömeke (2003): Logistikkonzepte im Schlüsselfertigbau zur Erhöhung der Kostenführerschaft, S. 277 ff.

¹⁶⁵ Vgl. Günthner/Zimmermann (2008): Logistik in der Bauwirtschaft, S. 11 ff.

¹⁶⁶ Vgl. Helmus et al. (2009): RFID in der Baulogistik, S. 32

¹⁶⁷ Vgl. Schach/Schubert (2009): Logistik im Bauwesen, S. 59 ff.

¹⁶⁸ Vgl. Zimmermann/Haas (2009): Baulogistik: Motivation – Definition – Konzeptentwicklung, S. 12

¹⁶⁹ Vgl. Krauß (2005): Die Baulogistik in der schlüsselfertigen Ausführung, S. 20

¹⁷⁰ Vgl. Günthner/Zimmermann (2008): Logistik in der Bauwirtschaft, S. 12

spezifischen baulegistischen Subsysteme werden in den Bauprozess integriert und es entstehen funktionsübergreifende Prozesse und Prozessketten.¹⁷¹ Wesentliche Beiträge zur Querschnittsfunktion der Baulegistik stellen u. a. die Veröffentlichungen von KRAUSS¹⁷² und SEEMANN¹⁷³ dar.

Nach GIRMSCHEID beinhaltet die Logistikplanung einer Bauunternehmung die Elemente der Leistungserstellungs-, Werkhof-, Beschaffungs- und Entsorgungslogistik. Im Zuge der Arbeitsvorbereitung werden diese Elemente für eine leistungsgerechte Durchführung der Bauproduktion miteinander verknüpft.¹⁷⁴ Die Leistungserstellungslogistik (Mengenanalyse, Ablaufplanung, Baustelleneinrichtung und weitere Elemente nach GIRMSCHEID) und die Werkhoflogistik (Maschinen, Geräte und weitere Elemente nach GIRMSCHEID) können somit als Teil der Arbeitsvorbereitung und als Input-Parameter für die Planung und Realisierung der Beschaffungs-, Baustellen- und Entsorgungslogistik interpretiert werden.

Eine weiterführende Betrachtung der phasenspezifischen Subsysteme führt zur nächsten Entwicklungsstufe der Baulegistik. Die Baulegistik integriert einzelne Funktionen zu Prozessketten. Betrachtet man die Baustelle als temporäre Produktionsstätte und als zeitlich begrenztes Unternehmen, findet die Integration der Funktionen und der Prozesse zu Prozessketten innerhalb dieses Unternehmens statt. Dies entspricht dem ersten Entwicklungsschritt der dritten Entwicklungsstufe der grundständigen Logistik. In der Literatur sind vielfältige Definitionen und Beschreibungen zur Baulegistik zu finden, die auf Ansätzen der zweiten oder dritten Entwicklungsstufe beruhen. Der Übergang von einer funktionsübergreifenden Sichtweise der Baulegistik (zweite Entwicklungsstufe) zu einer Integration der Funktionen zu Prozessketten (dritte Entwicklungsstufe) ist fließend. Eine scharfe Trennung und Zuordnung der Definitionen und Beschreibungen zu den einzelnen Entwicklungsstufen ist daher nicht immer möglich und auch nicht zielführend. Maßgebende Beiträge zur zweiten Entwicklungsstufe respektive zum ersten Entwicklungsschritt der dritten Entwicklungsstufe der Baulegistik liefern mit einem zentralen Logistikkonzept für den Schlüsselfertigbau und mit Ansätzen für ein zentrales Logistikmanagement bei innerstädtischen Baustellen BOENERT/BLÖMEKE¹⁷⁵ und ETTER/GIRMSCHEID^{176, 177}. Die Ausführungen fokussieren sich auf die zentrale Koordination der verschiedenen Gewerke sowie der phasenspezifischen logistischen Subsysteme und Prozesse auf der Baustelle mit dem Ziel der Produktivitätssteigerung.

¹⁷¹ Vgl. Krauß (2005): Die Baulegistik in der schlüsselfertigen Ausführung, S. 20

¹⁷² Krauß (2005): Die Baulegistik in der schlüsselfertigen Ausführung

¹⁷³ Seemann (2007): Logistikkoordination als Organisationseinheit bei der Bauausführung

¹⁷⁴ Vgl. Girmscheid (2015): Angebots- und Ausführungsmanagement – prozessorientiert, S. 234 f.

¹⁷⁵ Boenert/Blömeke (2003): Logistikkonzepte im Schlüsselfertigbau zur Erhöhung der Kostenführerschaft

¹⁷⁶ Etter/Girmscheid (2012a): Zentrales Logistikmanagement auf innerstädtischen Baustellen – Strategische Umsetzung

¹⁷⁷ Etter/Girmscheid (2012b): Zentrales Logistikmanagement auf innerstädtischen Baustellen – Operative Umsetzung

Bereits bei den zuvor dargestellten Definitionen ist zu erkennen, dass versucht wird, unternehmensübergreifende Aspekte zu berücksichtigen.¹⁷⁸ Eine unternehmensübergreifende Integration sowie eine Flussorientierung der Prozesse zu Wertschöpfungsketten im Sinne eines Supply-Chain-Managements kann jedoch noch nicht festgestellt werden. Die zuvor beachteten unternehmensübergreifenden Aspekte beinhalten vielmehr die Integration der verschiedenen Gewerke auf der Baustelle und nicht die Integration der Prozesse entlang der Wertschöpfungskette. Einen maßgeblichen Beitrag zum Supply-Chain-Management im Bauwesen liefert SCHMIDT¹⁷⁹. Er definiert die Baulogistik als *„eine branchenspezifische Interpretation der fließsystemorientierten Logistikkonzeption, die den Auftragsabwicklungsprozess eines Bauprojekts als überbetriebliche Versorgungskette (Projekt Supply-Chain als Logistiksystem) zwischen den an einem Bauprojekt beteiligten Lieferanten für Baustoffe, Baugeräte, Baukonstruktions-, Bauausführungs- sowie -entsorgungsleistungen interpretiert, um ihn aus systemwirtschaftlicher Perspektive hinsichtlich eines gesteigerten Systemdurchsatzes, einer Verringerung zeitlicher und sachlicher Systembestände sowie einer Senkung der Systemkosten zu gestalten. Hierzu orientiert sich das Management der Baulogistik an den potentiellen physischen und organisatorischen Engpässen der Projekt Supply-Chain, um durch ihre Identifikation, Ausnutzung und Beseitigung den gesamten Fluss der Auftragsabwicklung eines Bauprojekts in Konfiguration, Programmierung und Mobilisierung kontinuierlich im Sinne eines Wertschöpfungsnetzwerks anzupassen.“*¹⁸⁰

Die Definition entspricht dem zweiten Entwicklungsschritt der dritten Entwicklungsstufe der grundständigen Logistik. Die Prozesse werden entlang der Wertschöpfungskette ausgehend vom Lieferanten bis hin zum endgültigen Verbrauchsort unternehmensübergreifend betrachtet. Die Definition beruht auf dem Basismodell des Supply-Chain-Managements. Auf Grund des auftragsspezifischen Projektcharakters der Bauproduktion mit weitgehend nicht repetitiven Supply-Chains kann das Basismodell konkretisiert und als Ansatz des Supply-Chain-Project-Managements bezeichnet werden.¹⁸¹ Es sind fünf projektspezifische und unternehmensübergreifende Supply-Chains zu unterscheiden – die Supply-Chain der Baukonstruktion, die Supply-Chain der Bauausführung, die Supply-Chain der Baugeräte, die Supply-Chain der Baustoffe und die Supply-Chain der Bauentsorgung.¹⁸² Die im Fokus dieser Arbeit stehende Supply-Chain der Baustoffe umfasst die *„unternehmensübergreifende Versorgungskette von Baustoffen zwischen Bauindustrie, Transportdienstleistern, Baustoffhandel und Baustoffverarbeitern.“*¹⁸³ Eine weiterführende Diskussion zum Supply-Chain-Management im Bauwesen

¹⁷⁸ Vgl. Krauß (2005): Die Baulogistik in der schlüsselfertigen Ausführung, S. 20

¹⁷⁹ Schmidt (2003): Wettbewerbsfaktor Baulogistik

¹⁸⁰ Schmidt (2003): Wettbewerbsfaktor Baulogistik, S. 182

¹⁸¹ Vgl. Schmidt (2003): Wettbewerbsfaktor Baulogistik, S. 22

¹⁸² Vgl. Schmidt (2003): Wettbewerbsfaktor Baulogistik, S. 143 f.

¹⁸³ Schmidt (2003): Wettbewerbsfaktor Baulogistik, S. 144

sowie eine Darstellung weiterer Veröffentlichungen zu dieser Thematik werden in Kapitel 3.1.2 vorgenommen.

Veröffentlichungen zur höchsten Entwicklungsstufe der grundständigen Logistik, also zu einer globalen Integration der Gesamtwertschöpfungsketten im Bauwesen sind dem Verfasser derzeit nicht bekannt. Als grundlegende Definition zur Baulogistik für diese Arbeit dient die bereits wiedergegebene Definition von RUHL. Die Definition berücksichtigt nicht nur die Ausführungsphase in Form der Baulogistikrealisierung sowie der phasenspezifischen logistischen Subsysteme sondern ebenso die Elemente der Initiierung und der Planung der Baulogistik im Kontext eines Supply-Chain-Managements im Bauwesen.

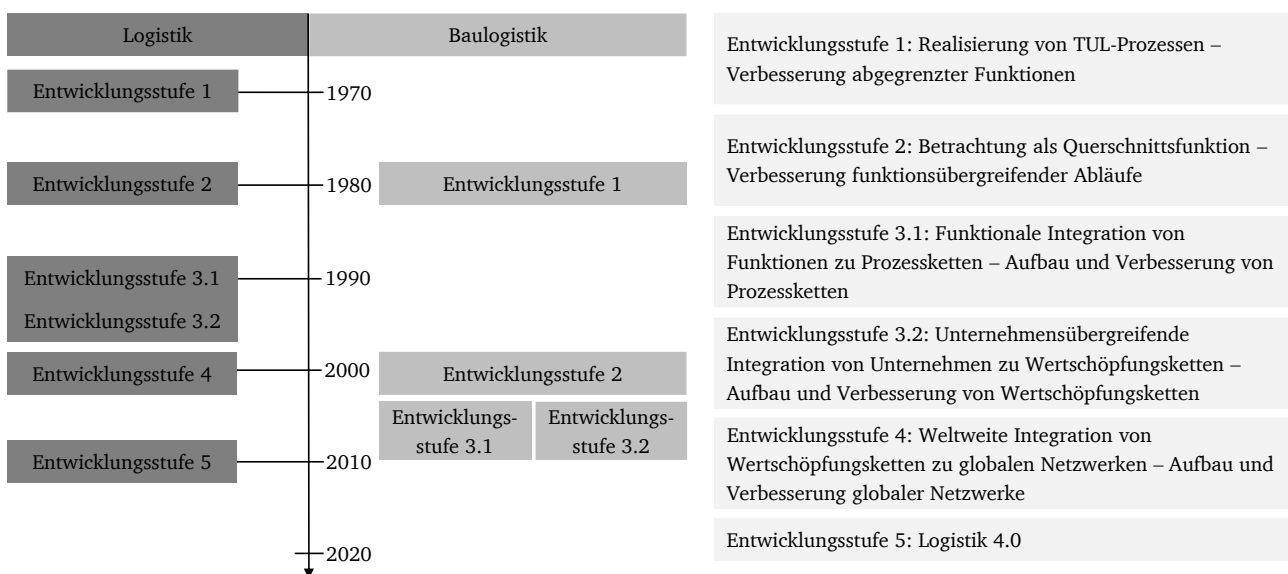


Abbildung 12: Gegenüberstellung der Entwicklungsstufen der Logistik und der Baulogistik¹⁸⁴

Abbildung 12 zeigt zusammenfassend die Entwicklung der Baulogistik im Vergleich zu jener der grundständigen Logistik nach BAUMGARTEN¹⁸⁵. Als Grundlage für die baulogistische Entwicklung dienen neben den Ausführungen in diesem Unterkapitel auch die detaillierten Darstellungen von KRAUSS¹⁸⁶, VOIGTMANN¹⁸⁷ und WEBER¹⁸⁸ auf die zur weiteren Vertiefung verwiesen wird. Hierbei ist anzumerken, dass die Übergänge zwischen den einzelnen Entwicklungsstufen fließend sind und im Speziellen bei den Definitionen zur Baulogistik eine explizite Trennung sowie eine eindeutige Zuordnung der Definitionen zu einzelnen Entwicklungsstufen nicht immer möglich und auch nicht zielführend sind. Dies ist u. a. damit zu begründen, dass bei der vielfältigen Anzahl an Definitionen zur Baulogistik teilweise innerhalb einer Definition Aspekte verschiedener Entwicklungsstufen interpretierbar sind. Hieraus

¹⁸⁴ Eigene Darstellung

¹⁸⁵ Vgl. Baumgarten (2008): Das Beste der Logistik – Auf dem Weg zu logistischer Exzellenz, S. 13 ff.

¹⁸⁶ Vgl. Krauß (2005): Die Baulogistik in der schlüsselfertigen Ausführung, S. 14 ff.

¹⁸⁷ Vgl. Voigtmann (2014): Simulation baulogistischer Prozesse im Ausbau, S. 8 ff.

¹⁸⁸ Vgl. Weber (2007): Simulation von Logistikprozessen auf Baustellen auf Basis von 3D-CAD Daten, S. 11 ff.

ergibt sich, dass die dargestellte zeitliche Abfolge bei der baulogistischen Entwicklung nicht den Anspruch hat, konkrete Jahreszahlen wiederzugeben, sondern vielmehr den prinzipiellen Verlauf der baulogistischen Evolution widerspiegeln soll. Des Weiteren ist herauszustellen, dass SCHMIDT zum Zeitpunkt der Definition zum Supply-Chain-Management im Bauwesen ein weit entwickeltes und innovatives Verständnis zur Baulogistik wiedergibt. Die Anzahl der Veröffentlichungen und Definitionen sowie Praxisbetrachtungen zeigen, dass das aktuelle Verständnis der Baulogistik vorwiegend die Integration von Prozessen und Funktionen zu Prozessketten fokussiert, also auf dem ersten Entwicklungsschritt der dritten Entwicklungsstufe beruht. Das aktuelle baulogistische Verständnis wird in Verbindung mit dem Stand der Forschung zur Baulogistik in Kapitel 2.2.3 thematisiert. Die in Abbildung 12 dargestellte Logistik 4.0 und deren Entwicklung werden in Kapitel 2.4.2 erläutert.

Da zum einen die Begriffe Beschaffungslogistik und Versorgungslogistik sowie zum anderen die Begriffe Baustellenlogistik und Produktionslogistik in der Fachliteratur synonym verwendet werden, sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass im weiteren Verlauf der Arbeit die Begriffe Versorgungslogistik und Produktionslogistik genutzt werden. Dies ist damit zu begründen, dass die Prozesse der Versorgung der Baustelle, sprich die Transporte und die damit verbundene Kommunikation im Vordergrund stehen und betriebswirtschaftliche Aspekte der Beschaffung wie bspw. die Verhandlung mit möglichen Bezugsquellen eine untergeordnete Rolle spielen. Um den Charakter einer Produktionsstätte „Baustelle“ herauszustellen, wird der Begriff der Produktionslogistik verwendet.

2.2.2 Organisations- und Koordinationsformen der Baulegistik

Die Planung, Steuerung und Ausführung von baulegistischen Prozessen erfordert auf Grund der Arbeitsteilung und der Aufgliederung in baulegistische Teilprozesse eine Organisation und Koordination der Baulegistik. Im folgenden Kapitel werden die wesentlichen Grundlagen zu den Organisations- und Koordinationsformen bei der Baulegistikrealisierung beschrieben. Auf die Auswirkungen der Trennung zwischen Planung und Ausführung und der daraus erforderlichen Organisation und Koordination wird im Speziellen in Kapitel 2.2.4 eingegangen. Hierzu wird ein Baulegistikprozessmodell als Integral der Initiierung, Planung, Koordination und Realisierung der Baulegistik vorgestellt.

Die Organisation der Baulegistik kann äquivalent zu anderen größeren Leistungssystemen und komplexen Logistiksystemen durch drei hierarchische Organisationsebenen charakterisiert werden. In der grundstätigen Logistik ergeben sich eine administrative respektive strategische, eine dispositive respektive taktische sowie eine operative Ebene.¹⁸⁹

In Bezug zur Baulegistik formuliert KRAUSS drei Aufgabenbereiche und Organisationsebenen der Baulegistik. Es wird zwischen der 1. Ebene, der Ausführung der räumlichen und zeitlichen Transferprozesse, der 2. Ebene, der Planung, Steuerung und Kontrolle dieser Material- und Informationsflüsse zur Ver- und Entsorgung der Baustelle sowie der 3. Ebene, der Gestaltung des Systems im Sinne eines ganzheitlichen Systemansatzes mit dem Ziel der Wertschöpfung unterschieden.¹⁹⁰ Die 1. Ebene entspricht dabei dem Gedanken einer operativen Ebene, die 2. Ebene einer dispositiven respektive taktischen Ebene und die 3. Ebene einer administrativen respektive strategischen Ebene.

SEEMANN differenziert das Logistiksystem der Baustelle nach Organisations-, Lenkungs- und Materialflussebene. Die Organisationsebene schafft den institutionell-strukturellen Rahmen der Koordination zwischen allen am Projekt Beteiligten. Die Lenkungsebene beinhaltet die Informationsflüsse sowie die Informationsverarbeitungs- und -austauschprozesse zur Durchführung der Planungs-, Steuerungs- und Kontrollaufgaben. Auf der Materialflussebene ist der physische Materialfluss verortet.¹⁹¹ Die Organisationsebene kann hier als administrative respektive strategische Ebene, die Lenkungsebene als dispositive respektive taktische Ebene und die Materialflussebene als operative Ebene interpretiert werden.

Zur Koordination von arbeitsteilig durchgeführten Prozessen sind eine Organisation, also die Festlegung von Kompetenzen, Arbeitsabläufen und deren Abgrenzung nötig. Durch die branchenspezifischen Rahmenbedingungen und der damit verbundenen projektindividuellen Pro-

¹⁸⁹ Vgl. Gudehus (2010): Logistik, S. 48

¹⁹⁰ Vgl. Krauß (2010): Organisationsmodelle für die Baulegistik in Deutschland, S. 19

¹⁹¹ Vgl. Seemann (2007): Logistikkoordination als Organisationseinheit bei der Bauausführung, S. 58 f.

jektorganisationen hat die Bauprojektorganisation hierbei eine erhebliche Relevanz. Die Ausgestaltung der Organisation der Baulogistik sowie die Integration der Baulogistikorganisation in die Organisationsstruktur des Gesamtprojekts, sind abhängig vom zugrunde liegenden Logistikverständnis und dem Initiator der Baulogistik, der dieses Logistikverständnis maßgeblich beeinflusst. Das Logistikverständnis prägt wesentlich den Umfang der baulogistischen Prozesse, die zu realisieren und in der Folge zu organisieren und koordinieren sind. Analog zur Aufbauorganisation der grundständigen Logistik kann die Baulogistik zentral oder dezentral organisiert werden. Die dezentrale Organisation verbunden mit der Aufteilung der logistischen Aufgaben stellt eine mögliche Organisationsform dar. Dem gegenüber steht die zentrale Organisation bei der logistische Aufgaben zusammengefasst und in einer organisatorischen Einheit integriert sind.¹⁹²

Im Folgenden werden die grundlegenden Organisationsformen der Baulogistik innerhalb eines Bauprojekts vorgestellt. Es ist anzumerken, dass diese Organisationsformen der Baulogistik wesentlich von der projektindividuellen Bauprojektorganisation abhängig sind. Es werden deshalb die Grundzüge der verschiedenen Organisationsformen der Baulogistik generalisierend beschrieben. Auf mögliche individuelle und projektabhängige Details oder Besonderheiten wird nicht vertiefend eingegangen. Außerdem werden die Organisationsformen der Baulogistik innerhalb eines Projekts erläutert. Die organisationale Eingliederung der Baulogistik innerhalb der Organisationen der ausführenden Unternehmungen kann aus den Ausführungen zur grundständigen Logistik in Kapitel 2.1.2 abgeleitet werden.

Bei der dezentralen Organisationsform der Baulogistik verantwortet jedes ausführende Unternehmen die baulogistischen Prozesse, die die eigene Leistungserstellung betreffen, selbst. Die Planung, Steuerung und Ausführung der baulogistischen Prozesse liegen bei dem jeweiligen Unternehmen. Die projektunabhängigen Beziehungen zwischen Unternehmen und Produzenten sowie Lieferanten bleiben bestehen und können genutzt werden. Die dezentrale Organisationsform kann auf der Baustelle zu Konflikten hinsichtlich der gemeinsamen Nutzung von Ressourcen führen. Die Zuordnung von Lagerflächen oder die Nutzung von Hebe geräten muss bspw. selbstständig zwischen den Beteiligten abgestimmt werden. Dies erfordert eine hohe Kompetenz und Erfahrung des bauleitenden Personals, das aber meist nur reaktiv auf auftretende Probleme reagieren kann. Eine übergeordnete und übergreifende Logistikplanung im Vorfeld sowie eine Instanz zur Koordination der Baulogistik fehlen.¹⁹³

Eine zentrale Organisationsform kann durch den Einsatz eines Logistikzentrums, durch ein Logistikmanagement oder durch die Bildung von Teilsystemen realisiert werden. Beim Einsatz eines Logistikzentrums wird in den Materialfluss zur Baustelle eingegriffen. Die Anlieferungen der einzelnen Unternehmen erfolgen zunächst nur bis zum Logistikzentrum. Hier

¹⁹² Vgl. Krauß (2010): Organisationsmodelle für die Baulogistik in Deutschland, S. 20

¹⁹³ Vgl. Krauß (2010): Organisationsmodelle für die Baulogistik in Deutschland, S. 21 f.

werden Lieferungen verschiedener Lieferanten zusammengefasst und zur Baustelle transportiert.¹⁹⁴ Mit dieser Organisationsform der Baulogistik wird sich in Kapitel 3.2.2 weiterführend beschäftigt.

Bei der zweiten Möglichkeit der zentralen Organisationsform der Baulogistik, dem zentralen Logistikmanagement, werden durch eine übergeordnete Rahmenplanung Regelungen zur zentralen Koordination der Logistikprozesse auf der Baustelle geschaffen. Die Ausführung der baulogistischen Prozesse obliegt weiterhin den ausführenden Unternehmen und deren Lieferanten, Produzenten oder Baustoffhändlern. Es erfolgt aber eine Überwachung sowie eine operative Steuerung der baulogistischen Prozesse durch einen Logistikleitstand und deren Logistikkordinatoren. Die Initiierung eines zentralen Logistikmanagements erfolgt meist durch einen Kumulativleistungsträger, bspw. einem Bauherren bei gewerkeweisen Einzelvergaben oder einem Generalunternehmer, der die Verantwortung aller von ihm beauftragten Leistungen trägt und somit an einer reibungslosen Abwicklung besonderes Interesse hat. Durch das zentrale Logistikmanagement können Reibungsverluste durch eine unkoordinierte Baulogistik reduziert werden.¹⁹⁵ Konzepte für ein zentrales Logistikmanagement entwickeln bspw. BOENERT/BLÖMEKE¹⁹⁶ und ETTER/GIRMSCHIED^{197,198}. Hierin sind u. a. Regelungen zur Koordination und Kommunikation des Materialbedarfs, zur Anlieferung und deren Avisierung, zum Lagerflächenmanagement, zum Materialtransport und -umschlag auf der Baustelle oder zur zentral organisierten Entsorgung zu finden.

Bei der zentralen Organisationsform durch die Bildung von Teilsystemen werden baulogistische Prozesse und Aufgaben zusammengefasst und einem Projektbeteiligten unternehmensübergreifend zugewiesen. Ein Beispiel ist die Teilsystembildung der Entsorgungslogistik. Die Baustellenentsorgung wird zentral organisiert und durch ein Unternehmen unternehmensübergreifend für alle ausführenden Unternehmen übernommen. Die Führungs- und Ausführungsaktivitäten eines Teilsystems oder eines Logistikbereichs werden gebündelt und führen zu einer erleichterten Abstimmung.¹⁹⁹

Die beschriebenen Organisationsformen der Baulogistik können projektindividuell miteinander kombiniert werden. Das Ziel der projektspezifischen Organisationsformen der Baulogistik ist eine möglichst ganzheitliche und unternehmensübergreifende Gestaltung gemäß einem aktuellen und modernen Logistikverständnis. Dies ist durch eine zentralisierte Organisationsform zu realisieren. Zur Erweiterung der Gestaltungsmöglichkeiten über die Durchführung und Koordination der baulogistischen Prozesse hinaus, ist die Baulogistik als ein System aus

¹⁹⁴ Vgl. Krauß (2010): Organisationsmodelle für die Baulogistik in Deutschland, S. 22

¹⁹⁵ Vgl. Krauß (2010): Organisationsmodelle für die Baulogistik in Deutschland, S. 23

¹⁹⁶ Boenert/Blömeke (2003): Logistikkonzepte im Schlüsselfertigbau zur Erhöhung der Kostenführerschaft

¹⁹⁷ Etter/Girmscheid (2012a): Zentrales Logistikmanagement auf innerstädtischen Baustellen – Strategische Umsetzung

¹⁹⁸ Etter/Girmscheid (2012b): Zentrales Logistikmanagement auf innerstädtischen Baustellen – Operative Umsetzung

¹⁹⁹ Vgl. Krauß (2010): Organisationsmodelle für die Baulogistik in Deutschland, S. 24

Planung und Ausführung sowie den dazugehörigen logistischen Prozessen zu behandeln.²⁰⁰ Das in Kapitel 2.2.4 vorgestellte Baulogistikprozessmodell greift diesen Systemgedanken auf und schafft ein Integral der Initiierung, Planung, Koordination und Realisierung der Baulogistik. Neben der von KRAUSS²⁰¹ empfohlenen zentralisierten Aufbauorganisation der Baulogistik ist ebenso eine gewerkeübergreifende Zentralisierung und Durchführung der baulogistischen Ausführungsprozesse auf der operativen Ebene respektive auf der Materialflussebene anzustreben. Dieser Aspekt wird im Zuge der Systembeschreibung des entwickelten Baustellenversorgungssystems in Kapitel 4.2.1 aufgegriffen und vertieft.

Die Koordination der Baulogistik ist in eine horizontale und vertikale Koordination zu unterteilen. Die horizontale Koordination beschreibt die gegenseitige Abstimmung von unabhängigen und gleichrangigen Organisationseinheiten. Als Koordinationsinstrument der aufeinander folgenden und voneinander abhängigen Teilprozesse kann, wie in Kapitel 2.1.2 erörtert, die Selbstabstimmung eingesetzt werden. Die horizontale Koordination durch Selbstabstimmung bietet ein hohes Potenzial an Flexibilität. Konflikte und Engpässe können unmittelbar auf der Prozessebene korrigiert werden, auf der sie auftreten. Die ausführenden Unternehmen sind für ihre Versorgungsprozesse sowie die Materialbeschaffung selbstständig verantwortlich und koordinieren die Prozesse von der Materialbestellung bis zum Transport zur Einbaustelle mit dem Lieferanten und den weiteren betroffenen Projektbeteiligten durch Selbstabstimmung. Durch diese horizontale Koordination kann ein unzureichender Überblick seitens der einzelnen Unternehmen über die Verfügbarkeit der vorhandenen Kapazitäten entstehen. Des Weiteren ist eine Fokussierung auf die individuellen Ziele der einzelnen Unternehmen festzustellen. Das übergeordnete Gesamtziel wird vernachlässigt und durch die mangelhafte Integration der Prozesse kommt es zu einer verminderten Produktivität des Gesamtsystems Baustelle.²⁰²

Bei der vertikalen Koordination werden im Sinne einer hierarchischen Planung auf einer übergeordneten Ebene Rahmenbedingungen und Vorgaben für die untergeordnete Ebene formuliert und deren Entscheidungsspielraum eingeschränkt. Auf der untergeordneten Ebene werden auf Grundlage dieser Vorgaben Detailplanungen ausgearbeitet und an die übergeordnete Ebene übergeben. Auf der übergeordneten Ebene wiederum werden die verschiedenen Detailplanungen aller untergeordneten Ebenen zusammengeführt und hinsichtlich der Umsetzung der Rahmenbedingungen und Vorgaben geprüft. Dies ermöglicht eine Rückkopplung zwischen der untergeordneten und übergeordneten Ebene. Die Rahmenplanung kann dabei eine Fortschreibung erfahren. Im Gegensatz zur Selbstabstimmung bei der horizontalen Koordination werden Abstimmungs- und Schnittstellenprobleme unter Einbeziehung der

²⁰⁰ Vgl. Krauß (2010): Organisationsmodelle für die Baulogistik in Deutschland, S. 24 f.

²⁰¹ Vgl. Krauß (2010): Organisationsmodelle für die Baulogistik in Deutschland, S. 24 f.

²⁰² Vgl. Seemann (2007): Logistikkoordination als Organisationseinheit bei der Bauausführung, S. 53 f.

übergeordneten Ebene und nicht mehr nur auf der Ebene, auf der die Probleme entstehen, gelöst. Hierbei besitzt jede Ebene einen festgelegten Entscheidungsspielraum mit entsprechenden Kompetenzen und Befugnissen. Bei Problemen, die den Entscheidungsspielraum der untergeordneten Ebene überschreiten, wird zur Problemlösung die übergeordnete Ebene mit einbezogen. Die übergeordnete und zentrale, vertikale Koordination stellt die Abstimmung und Integration der unterschiedlichen Teilprozesse aus Sicht des Gesamtsystems sicher. Als Koordinationsinstrument der vertikalen Koordination dienen, wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben, vor allem Pläne und Programme sowie die persönliche Weisung.²⁰³ Zur weiteren Vertiefung wird auf das von SEEMANN²⁰⁴ entwickelte Lenkungssystem der Logistikkoordination verwiesen.

²⁰³ Vgl. Seemann (2007): Logistikkoordination als Organisationseinheit bei der Bauausführung, S. 54 ff.

²⁰⁴ Seemann (2007): Logistikkoordination als Organisationseinheit bei der Bauausführung

2.2.3 Stand der Forschung zur Baulogistik

Zur weiteren Verortung des Forschungsgegenstands der vorliegenden Arbeit und zur Veranschaulichung des bereits dargestellten Forschungsbedarfs werden in diesem Kapitel die für die Arbeit relevanten Forschungsansätze sowie der Stand der Forschung zur Baulogistik vorgestellt. Hierbei erfolgt eine thematische Differenzierung in die Forschungsfelder Planung und Koordination der Baulogistik, Materialversorgungsprozesse, RFID im Kontext der Baulogistik sowie Supply-Chain-Management im Bauwesen und Warenverteilzentren in der Bauindustrie.

KRAUSS²⁰⁵ entwirft ein Planungsmodell zur Entwicklung von projekt- und fertigungsspezifischen Logistikprozessen für den Einsatz bei Bauunternehmungen des Schlüsselfertigbaus. In Abhängigkeit des ermittelten Flächenbedarfs, der Bauprozesse sowie der Versorgungspakete der einzelnen Gewerke wird ein Flächenplanungsmodell für die Baustellenlogistik erarbeitet und in eine modellhafte Softwarelösung überführt. Durch das Flächenplanungsmodell sollen die Fertigungs- und Versorgungsprozesse synchronisiert werden respektive den Fertigungsprozessen die benötigten Ressourcen zugeordnet und in die Versorgungsprozesse integriert werden.

HOFSTADLER²⁰⁶ stellt in einer Publikation, die auf seiner Habilitationsschrift basiert, u. a. Interaktionsdiagramme zur Mengenermittlung der Baustoffe im Rohbau, zur Mengenermittlung und den Einsatz der Schalung, zur Ermittlung der Anzahl der Krane sowie zur Logistik und hier im Speziellen Interaktionsdiagramme zur Beschaffungs- und Transportlogistik bei Rohbauarbeiten sowie zur Lagerhaltung der Bewehrung, des Zements und der Ziegel vor. Die Interaktionsdiagramme sind für den Einsatz bei ausführenden Bauunternehmungen ausgelegt und unterstützen die Bauablaufplanung und die Logistik in den Phasen der Fein- und Grobplanung. Die Interaktionsdiagramme verbinden verschiedene Einflussfaktoren und den jeweiligen Ressourcenverbrauch, stellen baubetriebliche Zusammenhänge übersichtlich dar und unterstützen und dokumentieren nachvollziehbar und transparent den Entscheidungs- und Planungsprozess.

SEEMANN²⁰⁷ publiziert ein unternehmensübergreifendes Lenkungsmodell für die Versorgungs- und Baustellenlogistik. Das Lenkungsmodell dient als unterstützendes Entscheidungssystem für die Logistikkoordination auf der Baustelle. Der Schwerpunkt der Betrachtung liegt daher auf der Baulogistikrealisierungsphase sowie den Koordinationstätigkeiten innerhalb und zwischen den verschiedenen Lenkungsebenen.

²⁰⁵ Krauß (2005): Die Baulogistik in der schlüsselfertigen Ausführung

²⁰⁶ Hofstadler (2007): Bauablaufplanung und Logistik im Baubetrieb

²⁰⁷ Seemann (2007): Logistikkoordination als Organisationseinheit bei der Bauausführung

RUHL²⁰⁸ stellt ein weiter gefasstes Baulogistikprozessmodell vor. Der ganzheitliche Planungsansatz der Baulogistik umfasst bereits die frühzeitige Einbindung der Baulogistik in den frühen Planungsphasen. Es werden die Phasen der Baulogistikinitiierung, der Baulogistikplanung sowie der Baulogistikorganisation und -realisierung eingeführt. Das Baulogistikprozessmodell in Verbindung mit definierten Übergabeparametern dient als Integral der Baulogistikplanung und der Baulogistikausführung und reduziert Informationsverluste an Schnittstellen. Das Baulogistikprozessmodell wird weiterführend in Kapitel 2.2.4 erläutert.

KAMM²⁰⁹ publiziert ein Modell zur Verbesserung der Materialdisposition zwischen Bauunternehmung und Materiallieferanten und die damit verbundene kostenoptimale Versorgung der Baustelle. Hierzu wird ein computergestützter Bestellalgorithmus aus Sicht der Bauunternehmung entwickelt. Das Ziel ist die Lieferanten- und Angebotsbewertung und die Ermittlung der bestmöglichen Bestellmenge sowie des bestmöglichen Bestellzeitpunkts hinsichtlich der Kosten.

SANLADERER²¹⁰ behandelt die Transportlogistik in der Bauindustrie und entwirft eine EDV-gestützte Disposition mit Hilfe von mobilen Erfassungsgeräten. Durch ein GPS-gestütztes Flottenmanagementsystem mit mobiler Datenerfassung können manuelle Prozessschritte reduziert werden. Dies ermöglicht u. a. eine schnelle Abrechnung gegenüber dem Kunden sowie eine Vereinfachung interner Prozesse wie bspw. die statistische Auswertung des Transportbetriebs. Des Weiteren ist durch den jederzeit abrufbaren Status und die Position eine dynamische Fahrzeugdisposition im Laufe des Tages und somit eine verbesserte und detailliertere Planung der Transportaufträge möglich.

LANGÉ²¹¹ entwickelt ein Modell zur bedarfssynchronen Steuerung der Materialversorgungsprozesse auf der Baustelle. Durch eine rollierende Bauproduktionsterminplanung werden die baubegleitend stattfindenden Planungs- und Fertigungsprozesse aufeinander ausgerichtet und miteinander verknüpft. Der Fokus des Modells liegt hierbei auf den Materialflüssen innerhalb des Logistiksystems „Baustellenlogistik“ als auch auf den Materialbestellzeitpunkten. Das Modell setzt darüber hinaus ausreichende Lager- und Kommissionierflächen auf dem Baustellengelände voraus. Im Ausblick werden eine Echtzeitsteuerung der Materialflüsse, eine Verbesserung der Informationsflüsse sowie eine schnelle und eindeutige Identifizierung der Materialien mittels Sensoren empfohlen. Diese Aspekte werden im Zuge der Modellentwicklung nicht konkretisiert und stellen Anknüpfungspunkte für die vorliegende Arbeit dar.

²⁰⁸ Ruhl (2016): Entwicklung eines Baulogistikprozessmodells

²⁰⁹ Kamm (1994): Materialwirtschaftliche Steuerung im Baubetrieb

²¹⁰ Sanladerer (2008): EDV-gestützte Disposition mit Telematikeinsatz und mobiler Datenerfassung in der Baulogistik

²¹¹ Lange (2017): Die Organisation einer flussorientierten Baulogistik für den Ausbau

DENZER²¹² erarbeitet ein Kooperationsmodell für den Baustoff-Fachhandel. Das Kooperationsmodell integriert dabei einen neutralen Logistiker als Bindeglied zwischen der Baustoffindustrie und der Baustelle in die Dispositionsprozesse der Kooperationspartner. Das Sendungsvolumen der Transportlogistik der Kooperationspartner kann konsolidiert und die Transporteffizienz der Beteiligten mittels einer Reduzierung der zu fahrenden Gesamtstrecken verbessert werden.

KÜPPERSBUSCH²¹³ entwickelt ein Modell zur BIM-basierten und taktsynchronen Materialversorgung in der Ausbauphase von Hochbaubaustellen. Hierzu kommen kommissionierte Warenkörbe in Verbindung mit einer logistikbasierten Taktplanung zum Einsatz. Das Modell basiert auf der Adaption von produktionsrelevanten Aspekten der Automobilindustrie. In diesem Zusammenhang sind u. a. die Modellvoraussetzungen einer im Detail abgeschlossenen Ausführungsplanung und daher ein Ausschluss von Änderungswünschen seitens der Bauherrschaft sowie einer ausreichenden Flächenverfügbarkeit auf dem Baufeld kritisch zu hinterfragen. Die Ausführungen und Entwicklungen im Kontext der kommissionierten Warenkörbe stellen Anknüpfungspunkte für die vorliegende Arbeit dar.

KLAUBERT²¹⁴ und MEINS-BECKER²¹⁵ befassen sich mit der RFID-basierten Kennzeichnung und Identifikation von baulogistischen Objekten sowie der Informationserhebung und Datenaufnahme im Kontext baulogistischer Prozesse mit dem Ziel, den Baufortschritt sowie die baulogistischen Prozesse darzustellen. Die Daten werden in ein zentrales Datenbankmanagementsystem eingepflegt und ermöglichen eine strukturierte und teilautomatisierte Dokumentation.

KLAUBERT wirkt den Schnittstellenverlusten durch nicht dokumentierte oder papierbasierte Prozesse mit einem echtzeitnahen und medienbruchfreien Informations- und Kommunikationssystem für die Baulogistik entgegen. Es wird eine Informationsstruktur mit durchgängigem Informationsfluss geschaffen.

MEINS-BECKER entwickelt das Modell „BAULOG“, das eine (teil-)automatisierte Erfassung von Ist-Prozessdaten sowie einen lückenlosen, transparenten Informationsfluss im Kontext der Versorgungsketten in der Bauwirtschaft zum Ziel hat. Das Modell ermöglicht eine Kontrolle von Logistikprozessdaten in Echtzeit, ein rechtzeitiges Steuern dieser Prozesse sowie eine medienbruchfreie Dokumentation der Ergebnisse.

BINDER²¹⁶ zeigt, dass die Echtzeitsteuerung von baulogistischen Prozessen möglich ist. Hierzu werden mittels RFID-Sensoren Ortungsdaten erfasst und innerhalb eines Echtzeit-Or-

²¹² Denzer (2019): Entwicklung eines Kooperationsmodells für die Transportlogistik im Baustoff-Fachhandel

²¹³ Küppersbusch (2020): Taktsynchrone Materialversorgung der Ausbauphase durch kommissionierte Warenkörbe

²¹⁴ Klaubert (2011): Entwicklung eines RFID-basierten Informations- und Kommunikationssystems für die Baulogistik

²¹⁵ Meins-Becker (2011): Modell zur Unterstützung baulogistischer Prozesse entlang der Versorgungskette der Bauwirtschaft

²¹⁶ Binder (2014): Ereignisbasierte Steuerung baulogistischer Prozesse mit Echtzeit-Ortungssystemen

tungssystems sowie basierend auf einem ereignisbasierten Prozessidentifikationsansatz automatisiert auf den Prozesstatus geschlossen. Die Position dient somit als Prozessindikator und ist Grundlage für Steuerungsmaßnahmen. Dieser Ansatz wird in der vorliegenden Arbeit genutzt und unter Verwendung der aktuell zur Verfügung stehenden Sensoren weiterentwickelt und zur Anwendung gebracht.

Im Kontext des Supply-Chain-Managements im Bauwesen sind als wesentliche deutschsprachige Beiträge zum Stand der Forschung u. a. die Dissertationen von SCHMIDT²¹⁷ und GOLDENBERG²¹⁸ zu nennen. Eine Darstellung und Diskussion dieser und weiterer Veröffentlichungen wird in Kapitel 3.1.2 vorgenommen. Der Stand der Forschung sowie der Einsatz von Warenverteilzentren in der Bauindustrie werden ebenfalls in dem eigenständigen Kapitel 3.2.2 diskutiert.

²¹⁷ Schmidt (2003): Wettbewerbsfaktor Baulogistik

²¹⁸ Goldenberg (2005): Optimierung von Supply Chain Prozessen in der Bauwirtschaft durch mobile Technologien und Applikationen

2.2.4 Baulogistikprozessmodell

Auf die Relevanz der Baulogistik und damit verbunden deren Rolle als ein zentraler Erfolgsfaktor für die effiziente und sichere Realisierung von Bauprojekten wurde bereits verwiesen. Gleichzeitig ist eine unvollständige Nutzung der Potenziale der Baulogistik in der gegenwärtigen Baupraxis festzustellen. In diesem Kapitel wird ein Prozessmodell der Baulogistikplanung vorgestellt, welches die Relevanz der Baulogistik bereits in den Planungsphasen würdigt und somit die Nutzung der Potenziale der Baulogistik in der Baupraxis steigert. Hierzu kann eine Fachplanung Baulogistik innerhalb der Bauprojektorganisation aktiviert werden.

An dieser Stelle wird mit Bezug zu Kapitel 2.2.1 darauf verwiesen, dass Bestrebungen zur Steigerung der Potenziale der Baulogistik u. a. auch bei den Veröffentlichungen von BOENERT/BLÖMEKE²¹⁹ und ETTER/GIRMSCHEID²²⁰ zu erkennen und zu würdigen sind. BOENERT/BLÖMEKE entwickeln ein Logistikkonzept, welches durch die Integration weiterer Dienstleistungen über die vorherige reine Versorgungsfunktion der Baulogistik hinausgeht. Das vorgestellte Logistikkonzept bleibt aber auf die Realisierungsphase beschränkt. ETTER/GIRMSCHEID stellen innerhalb des Logistikmanagements eine zur Bauproduktionsprozessplanung parallele und rollierende Logistikprozessplanung vor und definieren die Begriffe des Baulogistikgrobkonzepts, des Baulogistikkonzepts, des Baulogistikfeinkonzepts und der Konzeptumsetzung. Die weiteren Ausführungen von ETTER/GIRMSCHEID fokussieren sich auf das Baulogistikfeinkonzept und bleiben daher im Wesentlichen auf die Realisierungsphase beschränkt. Es ist daher zu konstatieren, dass sowohl die Ausführungen von BOENERT/BLÖMEKE als auch die Ausführungen von ETTER/GIRMSCHEID die relevanten frühen Planungsphasen vernachlässigen.

Das im weiteren Verlauf dieses Kapitels vorgestellte Prozessmodell der Baulogistikplanung lehnt sich somit zwar an bereits etablierte Begriffe an, erweitert und konkretisiert diese aber, formuliert diese neu und führt neue Aspekte und Inhalte ein. Wesentliche Neuerungen im Zuge der Entwicklung des Prozessmodells der Baulogistik sind die durchgeführten Untersuchungen zur Relation der einzelnen Bauprojektbeteiligten und damit verbunden die Identifikation von Schwachstellen in der Projektorganisation sowie die Offenlegung und Eingrenzung von Schwachstellen im Zusammenhang mit Planungsschnittstellen und Schnittstellen zwischen der Ausschreibung und der Arbeitsvorbereitung als Resultat einer mangelnden Berücksichtigung der Baulogistik. Durch die Integration der Baulogistikplanung in die Planungsphasen sowie die Anwendung des Baulogistikprozessmodells in der Projektvorbereitung wird der Transfer der Planungsergebnisse in die Produktionsprozesse verbessert. Dies

²¹⁹ Boenert/Blömeke (2003): Logistikkonzepte im Schlüsselfertigbau zur Erhöhung der Kostenführerschaft

²²⁰ Etter/Girmscheid (2012a): Zentrales Logistikmanagement auf innerstädtischen Baustellen – Strategische Umsetzung

führt zu einer erhöhten Termin- und Kostensicherheit sowie Ausführungsqualität im Produktionsprozess. Das Baulogistikprozessmodell berücksichtigt darüber hinaus sowohl die Leistungsphasen nach HOAI als auch die Projektstufen nach AHO und definiert die Verantwortlichkeiten der Bauprojektbeteiligten im Kontext der Baulogistik.²²¹

Auf Basis der Grundbegriffe der Literatur sowie der o. g. Untersuchungen und der in Kapitel 2.2.1 vorgestellten Definition der Baulogistik nach RUHL²²² wurde am Institut für Baubetrieb der TU Darmstadt das in Abbildung 13 über den Gesamtprojektablauf dargestellte Verständnis und Prozesskonzept der Baulogistik abgeleitet und entwickelt.

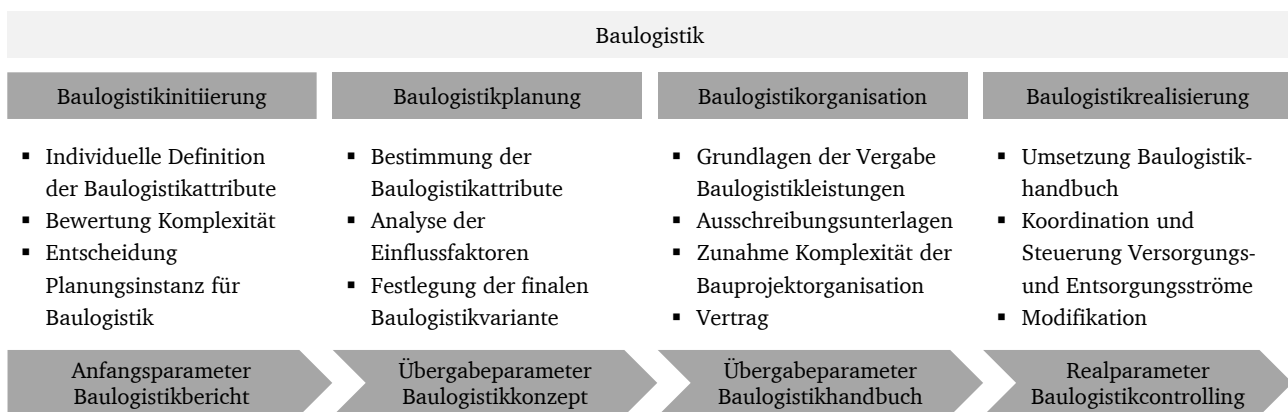


Abbildung 13: Prozesskonzept der Baulogistik²²³

Die Versorgungs-, Produktions-, Entsorgungs- und Informationslogistik stellen im Prozesskonzept der Baulogistik die Basis und die entscheidenden Zielgrößen im Rahmen der Baulogistikrealisierung dar. Um während der Baulogistikrealisierungsphase die Vorteile einer ganzheitlichen Betrachtung der baulogistischen Randbedingungen und Schnittstellen verwirklichen zu können, ist ein projektindividuelles Durchlaufen der vorgelagerten Phasen der Baulogistikinitiierung, -planung und -organisation erforderlich. Diese Phasen werden durch verschiedene zu erstellende Dokumentationen abgeschlossen. Im Zuge der Baulogistikinitiierung wird die baulogistische Komplexität projektindividuell anhand von definierten Baulogistikattributen bewertet. Die Ergebnisse werden in einem Baulogistikbericht festgehalten und dienen als Anfangsparameter der Baulogistikplanung. Das Baulogistikkonzept ist auf Grundlage eines iterativen Vorgehens während der Objekt- und Fachplanung das Ergebnis der Baulogistikplanung und beinhaltet die finale Baulogistikvariante. Das Baulogistikkonzept dient zum einen als Übergabeparameter für die Baulogistikorganisation und kann zum anderen erforderlicher Bestandteil respektive Voraussetzung für die Genehmigungsplanung werden. Die Baulogistikorganisation ist das abschließende Ereignis des Planungsprozesses und

²²¹ Vgl. Ruhl (2016): Entwicklung eines Baulogistikprozessmodells, Vorwort

²²² Vgl. Ruhl (2016): Entwicklung eines Baulogistikprozessmodells, S. 89

²²³ In Anlehnung an Ruhl et al. (2018): Baulogistikplanung, S. 10

wird durch das Bauleistungs-Handbuch dokumentiert. Das Bauleistungs-Handbuch stellt somit den Übergabeparameter zwischen Planung und Ausführung dar, formuliert ein Ausführungsregelwerk für die Bauleistungsrealisierungsphase und wird in der Phase der Vorbereitung zur Vergabe Bestandteil der Ausschreibungsunterlagen und im weiteren Verlauf Vertragsbestandteil. Durch die Realisierung des Bauleistungs-Handbuchs verbunden mit einer Umsetzungskontrolle in Form eines Bauleistungscontrollings wird der Bauleistungsprozess abgeschlossen. Dieser vorgestellte Bauleistungsprozess ist die Basis für das im Folgenden genauer erläuterte Bauleistungsprozessmodell.²²⁴

Das in Abbildung 14 dargestellte Bauleistungsprozessmodell würdigt sowohl die Projektstufen nach AHO Heft Nr. 9 als auch die Leistungsphasen nach HOAI. Zur übergeordneten Zuordnung der Bauleistungsplanung wird auf die Projektstufen nach AHO Heft Nr. 9 abgestellt. Zur Darstellung und zur Integration der Bauleistungsplanung in den Planungsprozess wird die kleinteiligere Aufgliederung nach den HOAI-Leistungsphasen gewählt. Des Weiteren erfolgt eine Zuordnung der Verantwortlichkeiten zu den verschiedenen Bauprojektbeteiligten.²²⁵

²²⁴ Vgl. Ruhl (2016): Entwicklung eines Bauleistungsprozessmodells, S. 88 f.

²²⁵ Vgl. Ruhl (2016): Entwicklung eines Bauleistungsprozessmodells, S. 99

Leistung		Bauherr Auftraggeber / Projektsteuerer	Planer Objektplaner / Baulogistikplaner	Auftragnehmer Unternehmer / Baulogistiker
Projektvorbereitung (Stufe 1)	Bedarfsplanung	Erfassen baulogistischer Einflussgrößen, Entwickeln von baulogistischen Zielen		
	Grundlagenermittlung (LPH 1)	Entscheidung zur Beauftragung einer Baulogistikplanung	Beraten zum Leistungsumfang und zu den zu Beteiligten (Objektplaner) Baulogistikbericht Grundlagenermittlung	
Planung (Stufe 2)	Vorplanung (LPH 2)	Überprüfung der Einflussgrößen	Baulogistikplanung der Vorplanung	
	Entwurfsplanung (LPH 3)	Aktualisierungen der Einflussgrößen	Baulogistikplanung des Entwurfs	
	Genehmigungsplanung (LPH 4)	Erwirken der Baugenehmigung	Baulogistikplanung für die Genehmigungsplanung Baulogistikkonzept	
Ausführungsvorbereitung (Stufe 3)	Ausführungsplanung (LPH 5)	Aktualisierungen der Einflussgrößen	Baulogistikausführungsvorbereitung und Entwicklung Baulogistikhandbuch	
	Vorbereitung der Vergabe (LPH 6)	Prüfung der Einflussgrößen	Baulogistikhandbuch	
	Mitwirken bei der Vergabe (LPH 7)	Entscheidung zur Beauftragung	Prüfung und Wertung der Angebote	Kalkulation, Arbeitsvorbereitung
Ausführung (Stufe 4)	Objektüberwachung (LPH 8)		Überwachung, Abrechnung Baulogistikcontrolling	Ver- und Entsorgungslogistik, Baustellenlogistik, Informationslogistik
Projektabschluss (Stufe 5)	Dokumentation (LPH 9)		Bericht	

Abbildung 14: Baulogistikprozessmodell²²⁶

²²⁶ In Anlehnung an Ruhl et al. (2018): Baulogistikplanung, S. 11 und Ruhl (2016): Entwicklung eines Baulogistikprozessmodells, S. 100

Es wurde bereits ausgeführt, dass durch Untersuchungen Schwachstellen in der Projektorganisation, Schwachstellen bei Planungsschnittstellen sowie Schwachstellen zwischen der Ausschreibung und der Arbeitsvorbereitung als Resultate einer mangelnden Berücksichtigung der Bauleistik identifiziert werden konnten. Diesen Schwachstellen wird mit dem Bauleistikprozessmodell und den zu erstellenden Dokumenten, die in den folgenden Unterkapiteln erläutert werden, entgegengewirkt.

2.2.4.1 Bauleistikinitiierung – Bauleistikbericht

Ein Lösungsansatz zur Schwachstelle *Projektorganisation* wird auf der Stufe 1 - Projektvorbereitung verwirklicht. Die Bauherrschaft benennt bauleistische Einflussfaktoren und stellt diese dem Objektplaner als Input für die Beratung zum Leistungsumfang und zu den zu Beteiligten zur Verfügung. Der durch den Objektplaner verfasste Bauleistikbericht dient der Bauherrschaft als Entscheidungsgrundlage zu einer möglichen Beauftragung einer Fachplanung Bauleistik sowie fortführend zur Ausrichtung, Art und Umfang der gegebenenfalls zu beauftragenden Bauleistikplanung.²²⁷ Der Bauleistikbericht hat die projektindividuelle Empfehlung zu einer Fachplanung Bauleistik zu begründen sowie die vertraglichen Zuordnungen der Leistungen und daraus resultierende Schnittstellen darzulegen. Die damit verbundenen kosten- und terminrelevanten Auswirkungen sind ebenfalls innerhalb des Bauleistikberichtes zu erläutern.²²⁸ Ausführungen zum Aufbau und zur Form des Bauleistikberichtes sowie weiterführenden Informationen zum Inhalt können RUHL²²⁹ und RUHL et al.²³⁰ entnommen werden.

2.2.4.2 Bauleistikplanung – Bauleistikkonzept

Ein Lösungsansatz zur Schwachstelle *Planungsschnittstellen* kann innerhalb der Projektstufe 2 - Planung verortet werden. Neben dem zu errichtenden Bauwerk ist ebenso der Produktionsprozess einer Planung zu unterwerfen. Hierdurch entstehen Schnittstellen zwischen den Planungsprozessen der Objektplanung und der Produktionsplanung. Im Kontext der Bauleistik ist die Bauleistikplanung durch ein Bauleistikkonzept in den Gesamtplanungsprozess zu integrieren. Das Bauleistikkonzept dokumentiert die iterativen Planungsprozesse der Leistungsphasen 2 bis 4 nach HOAI. Es sind in Abhängigkeit der Entscheidung über die Beauftragung einer Bauleistikplanung die Grundlagen der Objekt-, Fach- und Bauleistikplanung miteinander zu synchronisieren. Aufbauend auf der Grundlagenermittlung des Objektplaners wird eine Bauleistikplanung in der Qualität einer Vorplanung erstellt und wiederum

²²⁷ Vgl. Ruhl (2016): Entwicklung eines Bauleistikprozessmodells, S. 101

²²⁸ Vgl. Ruhl (2016): Entwicklung eines Bauleistikprozessmodells, S. 135

²²⁹ Vgl. Ruhl (2016): Entwicklung eines Bauleistikprozessmodells, S. 134 ff.

²³⁰ Vgl. Ruhl et al. (2018): Bauleistikplanung, S. 18 ff.

dem Objektplaner zur Integration in die objektplanerseitige Vorplanung zur Verfügung gestellt. Durch die in der Objektplanung integrierte Bauleistungsplanung hat die Bauherrschaft die Möglichkeit, die Projektziele zu kontrollieren und zu steuern sowie mögliche erforderliche Anpassungen durchzuführen. Die Bauherrschaft überprüft die Einflussfaktoren und wirkt bei einer Aktualisierung der Einflussgrößen mit. Diese Rückmeldungen fließen in die weitere Bearbeitung der Bauleistungsplanung ein und münden in einer Bauleistungsplanung in der Qualität einer Entwurfsplanung. Diese Entwurfsplanung wird ebenfalls dem Objektplaner zur Verfügung gestellt und in die Objektplanung integriert sowie der Bauherrschaft zur Zustimmung oder Anpassungsanordnung vorgelegt. Abgeschlossen wird der Lösungsansatz zur Schwachstelle *Planungsschnittstellen* mittels einer Dokumentation der iterativen Planungsprozesse durch das Bauleistungskonzept. Das Bauleistungskonzept stellt die festgelegte Art und Weise der Ausführung bauleistungsplanerischer Leistungen in Beziehung zur endgültigen Entwurfs- respektive Ausführungsvariante dar und erläutert diese. Des Weiteren werden die Ergebnisse der Vorabstimmungen mit den Behörden in das Bauleistungskonzept integriert und die Bauleistungsplanung als Bauleistungskonzept abgeschlossen und dokumentiert. Das Bauleistungskonzept kann als Ganzes oder in Teilen erforderlicher Bestandteil respektive Voraussetzung für die Genehmigungsplanung werden.²³¹

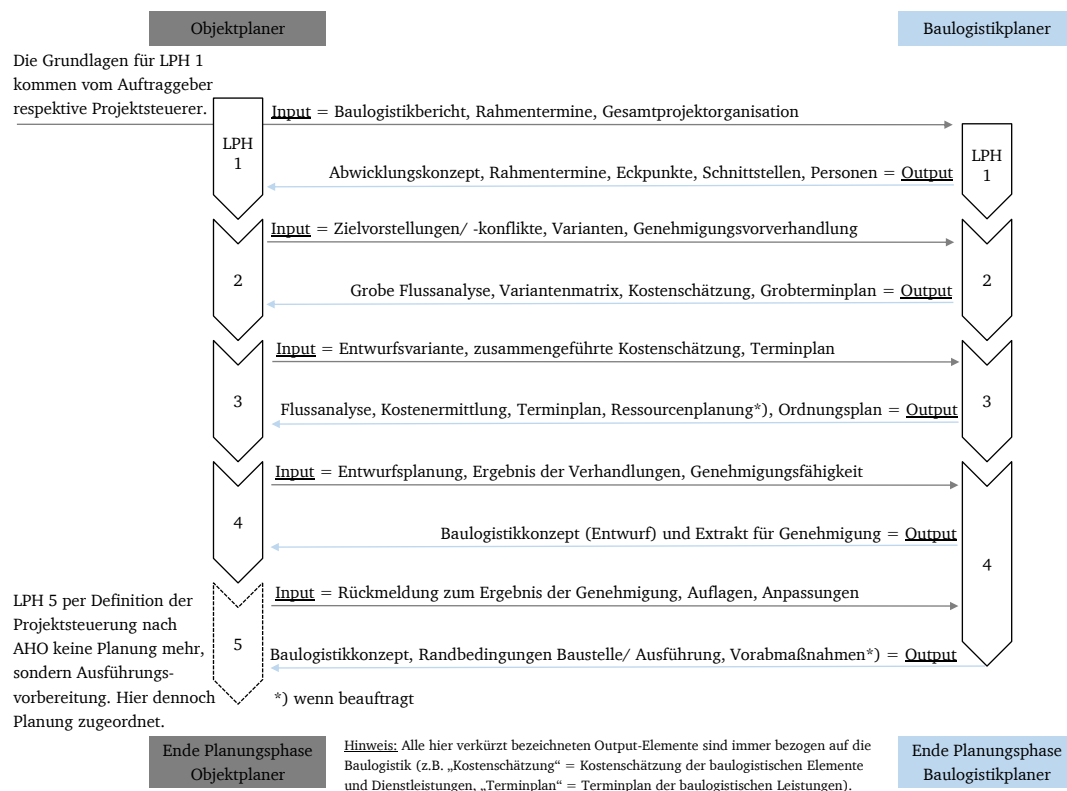


Abbildung 15: Ineinandergreifen der Planungsprozesse von Objekt- und Bauleistungsplanung²³²

²³¹ Vgl. Ruhl (2016): Entwicklung eines Bauleistungsprozessmodells, S. 102 f.

²³² In Anlehnung an Ruhl (2016): Entwicklung eines Bauleistungsprozessmodells, S. 160

Abbildung 15 visualisiert die Abhängigkeiten und das Ineinandergreifen der Planungsprozesse der Objekt- und Bauleistungsplanung. Das Bauleistungskonzept dient der Integration der Bauleistungsplanung in den Gesamtplanungsprozess und verfolgt das Ziel, den Genehmigungsprozess des Projekts zu unterstützen. Des Weiteren sollen durch das Bauleistungskonzept eine eindeutige und erschöpfende Leistungsbeschreibung sowie eine konflikt- und risikoarme Bauwerkserstellung im Kontext der Kosten-, Termin- und Qualitätsziele gewährleistet werden.²³³ Hierzu werden innerhalb der Planungsprozesse der verschiedenen Leistungsphasen nach HOAI unterschiedliche Planungswerkzeuge eingesetzt und Planungsergebnisse erarbeitet, die wiederum Bestandteile des Bauleistungskonzepts darstellen.

2.2.4.3 Bauleistungsorganisation – Bauleistungsbandbuch

Der Lösungsansatz zur Schwachstelle *Ausschreibung/Arbeitsvorbereitung* basiert auf einer Dokumentation dieser Schnittstelle durch das Bauleistungsbandbuch. Dieses überführt das Bauleistungskonzept in die Ausführungsphase und liefert für die Realisierungsphase ein Regelwerk für alle Projektbeteiligten. Im Zuge der Ausführungsplanung werden die planerisch abgestimmten bauleistungswirtschaftlichen Leistungen dokumentiert und umgesetzt. Es erfolgt eine Vorbereitung der Bauleistungswirtschaftsausführung und eine präzise Definition der Bauleistungswirtschaftsprozesse mit entsprechenden Regularien und Bestimmungen sowie eine Zuordnung zu den Prozessverantwortlichen²³⁴. Das Bauleistungsbandbuch, welches Bestandteil der Vertragsunterlagen wird, beschreibt somit die gültigen Produktionsrandbedingungen, konkretisiert und dokumentiert die Ausprägung der Bauleistungswirtschaftsattribute und hält die Ergebnisse von möglichen bauleistungswirtschaftlichen Vorabmaßnahmen fest. Dies führt dazu, dass die Dokumentation der Vorbereitung in Form des Bauleistungsbandbuchs als wesentliche Grundlage für die Kalkulation, die Preisbildung und die Arbeitsvorbereitung der ausführenden Unternehmungen dient und von herausragender Relevanz ist. Die Arbeitsvorbereitung wird durch die solide Vorbereitung seitens der Bauherrschaft verbessert und der Aufwand für die kalkulierenden Unternehmen verringert. Als Resultat der Berücksichtigung der Bauleistungswirtschaft in den Planungsprozessen und damit einhergehend der Entwicklung des Bauleistungsbandbuchs entsteht ein projektbezogener Mehrwert. Die bedeutende Schnittstelle zwischen Technik und Recht²³⁵ wird verbessert. Des Weiteren kann das Bauleistungsbandbuch als Teil der Leistungsbeschreibung für möglicherweise zu beauftragende Bauleistungswirtschaftsdienstleistungen dienen. Das Bauleistungsbandbuch ermöglicht durch die festgeschriebenen Ausführungsregeln und den damit verbundenen vertraglichen Vereinbarungen außerdem eine Überwachung und Abrechnung der beauftragten bauleistungswirtschaftlichen

²³³ Vgl. Ruhl (2016): Entwicklung eines Bauleistungswirtschaftsprozessmodells, S. 158 ff.

²³⁴ Zur grundsätzlich Zuordnung der Prozessverantwortlichen sowie den Vor- und Nachteilen der Zuordnung der Leistungen zu einem Hauptunternehmer, Einzeldienstleister oder Bauleistungswirtschaftsdienstleister vgl. Ruhl (2016): Entwicklung eines Bauleistungswirtschaftsprozessmodells, S. 174 ff.

²³⁵ Vgl. Girmscheid/Motzko (2013): Kalkulation, Preisbildung und Controlling in der Bauwirtschaft, S. 38

Leistungen durch den Planer sowie eine fortlaufende Kontrolle der beauftragten bauleistenden Leistungen durch die Bauherrschaft oder den Projektsteuerer.²³⁶ Auf Grund projektspezifischer Randbedingungen kann es zielführend sein, für verschiedene Bauphasen unterschiedliche Bauleistenden Handbücher zu erstellen.²³⁷ Eine Auswahl von inhaltlichen Strukturelementen des Bauleistenden Handbuchs kann RUHL et al.²³⁸ entnommen werden.

Zur weiteren Vertiefung sowie zur methodischen Herleitung des Bauleistenden Berichts²³⁹, -konzepts²⁴⁰ und -handbuchs²⁴¹ wird auf RUHL verwiesen. Des Weiteren liefern RUHL et al.²⁴² ein zusammenhängendes Praxisbeispiel, bei dem der gesamte Bauleistenden Prozess durchlaufen wird.

2.2.4.4 Bauleistenden Attribute – Bewertung der bauleistenden Komplexität

Auf Grund der Relevanz für die vorliegende Arbeit werden an dieser Stelle die Bauleistenden Attribute sowie die damit verbundene Bewertung der bauleistenden Komplexität bei der Erstellung des Bauleistenden Berichts thematisiert. Die Bewertung der bauleistenden Komplexität sollte auf Grund der propagierten Betrachtung in den frühen Projektphasen und somit nicht nach einer rein numerischen respektive mathematischen Auswertung erfolgen. Es sollte vielmehr mit Daten, Informationen und bildbezogenen Merkmalen gearbeitet werden. Die bauleistenden Einflussgrößen werden durch die Bauherrschaft oder den Projektsteuerer erfasst und dem Objektplaner zur Verfügung gestellt. Die Bewertung der übergebenen bauleistenden Einflussgrößen erfolgt anschließend in der Leistungsphase 1 nach HOAI durch den Objektplaner über das in Abbildung 16 dargestellte Entscheidungsnetz. Die frühzeitige Berücksichtigung der Baustellenrandbedingungen ermöglicht eine umfassende planerische Verbesserung der vorliegenden projektspezifischen Einflussgrößen. Es ist bspw. möglich, Baustellenrandbedingungen anzupassen, Bauprozesse und -abläufe in den Planungsprozess zu integrieren, Ressourcen planmäßig zu bündeln und durch entsprechende vertragliche Regelungen gemeinsam zu nutzen oder Zwangspunkte der Bauproduktion in der Planung zu berücksichtigen.²⁴³

²³⁶ Vgl. Ruhl (2016): Entwicklung eines Bauleistenden Prozessmodells, S. 103 ff.

²³⁷ Vgl. Ruhl (2016): Entwicklung eines Bauleistenden Prozessmodells, S. 178

²³⁸ Vgl. Ruhl et al. (2018): Bauleistenden Planung, S. 28 ff.

²³⁹ Vgl. Ruhl (2016): Entwicklung eines Bauleistenden Prozessmodells, S. 108 ff.

²⁴⁰ Vgl. Ruhl (2016): Entwicklung eines Bauleistenden Prozessmodells, S. 138 ff.

²⁴¹ Vgl. Ruhl (2016): Entwicklung eines Bauleistenden Prozessmodells, S. 162 ff.

²⁴² Vgl. Ruhl et al. (2018): Bauleistenden Planung, S. 33 ff.

²⁴³ Vgl. Ruhl (2016): Entwicklung eines Bauleistenden Prozessmodells, S. 111 f.

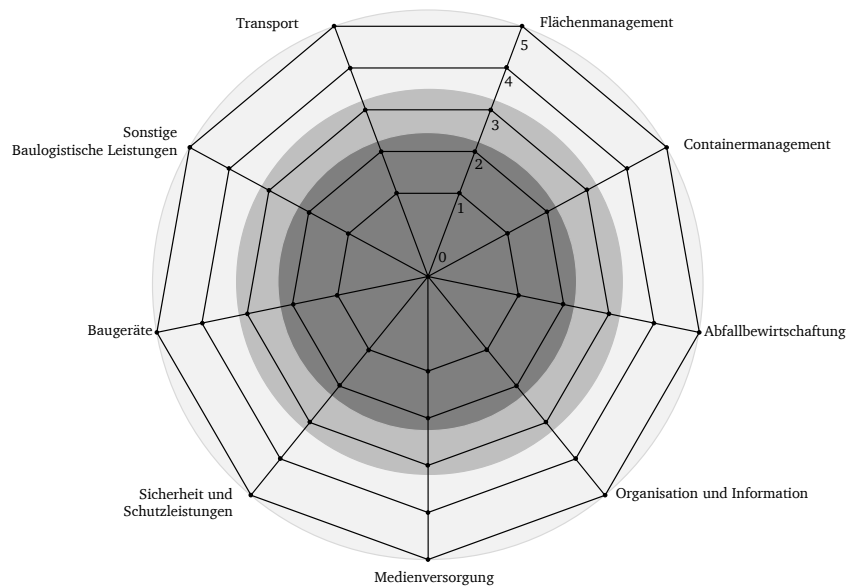


Abbildung 16: Entscheidungsnetz der Bauleistungs-Komplexität²⁴⁴

Das Entscheidungsnetz ermöglicht eine visuelle Darstellung mit einer geringen mathematischen Auswertungstiefe und die Berücksichtigung aller Bauleistungsattribute. Die Beurteilung, der von der Bauherrschaft übergebenen bauleistungsinfluierenden Einflussfaktoren, erfolgt durch eine verbale Argumentation sowie anhand der Erfahrungen und Einschätzungen des Objektplaners und daraus abgeleitet einer Einordnung der einzelnen Bauleistungsattribute in die Bewertungsskala von 0 Punkten (keine zu erwartende Komplexität dieser Kategorie, dunkelgraue Fläche) bis 5 Punkte (sehr hohe zu erwartende Komplexität dieser Kategorie, hellgraue Fläche). Das Entscheidungsnetz ist nicht als singuläres und in sich abgeschlossenes Element zu verstehen. Es sollte vielmehr Bestandteil des Bauleistungsberichts sein und innerhalb dessen erläutert und dokumentiert werden sowie als Arbeitshilfe gegenüber der Bauherrschaft bei der Erstellung des Bauleistungsberichts dienen. Die Beurteilung der bauleistungsinfluierenden Komplexität ist mit einer Empfehlung bezüglich der zu beauftragenden Fachleute, des Umfangs der Leistungen, des Vertragsinhalts sowie des zu erwartenden Honorars abzuschließen.²⁴⁵

Im Entscheidungsnetz der Bauleistung sind die Bauleistungsattribute Transport, Flächenmanagement, Containermanagement, Abfallbewirtschaftung, Organisation und Information, Medienversorgung, Sicherheit und Schutzleistungen, Baugeräte sowie sonstige bauleistungsinfluierende Leistungen bauprojektindividuell zu definieren und zu bewerten.^{246, 247}

²⁴⁴ In Anlehnung an Ruhl et al. (2018): Bauleistungsplanung, S. 14

²⁴⁵ Vgl. Ruhl (2016): Entwicklung eines Bauleistungsinfluierenden Prozessmodells, S. 113 ff.

²⁴⁶ Vgl. Ruhl et al. (2018): Bauleistungsplanung, S. 15 ff.

²⁴⁷ Vgl. Ruhl (2016): Entwicklung eines Bauleistungsinfluierenden Prozessmodells, S. 115 ff.

Das Baulogistikattribut *Transport* erfasst die Anbindungen an das bestehende Straßennetz, Verkehrsbeschränkungen, Verkehrssicherungen und Transportwege im öffentlichen Verkehrsraum sowie innerhalb des Baustellenraums selbst. Des Weiteren sind Emissionen sowie weitere Einschränkungen und Auswirkungen aus den Transportprozessen auf betroffene Dritte zu untersuchen. Es ist sorgfältig zu prüfen, ob zeit- und kostenintensive Sondergenehmigungen erforderlich werden.

Das Baulogistikattribut *Flächenmanagement* beschreibt zum einen die Fläche innerhalb der Baufeldgrenzen selbst einschließlich möglicher Besonderheiten und Standortmerkmalen und zum anderen die Interaktionen mit benachbarten Flächen sowie weitere Anliegerbelange bezüglich der Baustellenfläche. Die zur Verfügung gestellte Baustellenfläche wird hinsichtlich ihrer Eignung und Nutzung als Baustelleneinrichtungsfläche sowie deren Geometrie, Größe und Verfügbarkeit von Flächen sowie Auf- und Abbaurestriktionen von Geräten beurteilt. Besondere Beachtung sollte der Flächenbedarf für den Katastrophenschutz wie bspw. Zufahrten und Stellflächen für die Feuerwehr finden. Des Weiteren sind der Parkverkehr durch die auf der Baustelle tätigen Personen und die daraus resultierenden Einwirkungen auf die Umgebung zu berücksichtigen.

Das Baulogistikattribut *Containermanagement* beinhaltet die Bedarfsermittlung und die Vorhaltung der Büro-, Sozial- und Magazincontainer sowie deren Belegungsmanagement. Das Containermanagement befasst sich auch mit anderen Arten der Raumbereitstellung bspw. in Form der Anmietung von Immobilien. Bei der Planung und dem Betrieb der Containeranlage auf der Baustelle sind die gesetzlichen Vorschriften wie das Arbeitsschutzgesetz, die Baustellenverordnung sowie die Arbeitsstättenverordnung inklusive der besonderen Regelungen der DGUV einzuhalten.

Das Baulogistikattribut *Abfallbewirtschaftung* befasst sich mit dem Umgang von Abfällen auf der Baustelle gemäß dem Kreislaufwirtschaftsgesetz. Die durch die Produktionsprozesse auf der Baustelle zu erwartenden Bauabfälle und deren Handhabung innerhalb der Baustelle sowie außerhalb der Baustelle sind in den frühen Projektphasen einer Planung zu unterziehen. Die Handhabung in Form des Transports, der Lagerung und der Verbringung der Bauabfälle muss sicher, praktisch und kostengünstig erfolgen und die entsprechenden Anforderungen des Kreislaufwirtschaftsgesetzes würdigen.

Das Baulogistikattribut *Organisation und Information* beschäftigt sich mit den organisatorischen Lösungen sowie der Informationsdistribution. Es werden die Regelungen zu den Baustellenbetriebszeiten, die Regelungen zu den Kompetenzen sowie den Zuständigkeiten allgemeiner baulogistischer Aspekte, die Möglichkeiten der Information sowie der Kommunikation und die Merkmale der Einweisung, Kontrolle, Sanktion, Haftung sowie Bereitstellung im Kontext der Organisation und Information hinsicht-

lich ihrer Komplexität bewertet. Die Komplexität wird hinsichtlich des geplanten Umfangs jedes einzelnen Elements als auch hinsichtlich der Einschränkungen der Freiheitsgrade der ausführenden Unternehmungen analysiert.

Das Baulogistikattribut *Medienversorgung* fasst die für den Baustellenbetrieb notwendige Ver- und Entsorgung mit Medien zusammen. Für die Medien wie bspw. elektrischer Strom, Wasser, Druckluft, Treibstoff und Kommunikationsnetze ist die Komplexität u. a. bezüglich der Anordnung der Übergabepunkte, der Umfang der Verteilungsleitungen, die Verteiler selbst und die Distribution der Anschlusspunkte zu beurteilen. Das Baulogistikattribut *Sicherheit und Schutzleistungen* zielt darauf ab, die Vielzahl an Gesetzen und Regeln, die auf Baustellen gelten in Bezug zur Baulogistik zu würdigen. Es sollte aus baulogistischer Perspektive ein besonderes Augenmerk auf die Erfüllung der Verkehrssicherungspflicht gelegt werden. In diesem Zusammenhang ist die Vermeidung von erkennbaren Gefahren, die Sicherung der Baustelle gegen das unbefugte Betreten Dritter sowie der Schutz von Zugangsmöglichkeiten zu Gefahrstellen zu fokussieren.

Das Baulogistikattribut *Baugeräte* dient als Beurteilungsgrundlage hinsichtlich der geplanten Bauverfahren und Arbeitsabläufe. Mit besonderer Relevanz sind außerdem die Emissionen und die zu erwartenden physikalischen, sozialen und organisatorischen Umwelteinflüsse, die Nutzungsbedingungen sowie die gegenseitigen Abhängigkeiten der Baugeräte zu bewerten. Es ist zu prüfen, inwiefern es zielführend ist, ein zentrales Gerätemanagementsystem einzurichten. Die Zentralisierung mit entsprechenden Systemen sollte ebenfalls bei den Baulogistikattributen *Abfallbewirtschaftung* und *Medienversorgung* untersucht werden.

Das Baulogistikattribut *sonstige baulogistische Leistungen* steht für weitere Leistungen, die im Zuge der Baulogistikplanung zu erbringen sind zur Verfügung. Die Baureinigung oder der Winterdienst können hier bspw. aufgeführt werden.

Eine weiterführende inhaltliche Auseinandersetzung mit den vorgestellten Baulogistikattributen, der Auswertung des Entscheidungsnetzes sowie den Einflussgrößen der Bewertung innerhalb der einzelnen Baulogistikattribute respektive Anhaltspunkte zur Beurteilung zur baulogistischen Komplexität können RUHL²⁴⁸ entnommen werden. Des Weiteren wird auf die von RUHL²⁴⁹ zur Plausibilitätsprüfung des Entscheidungsnetzes dargestellten Anwendungsbeispiele des Entscheidungsnetzes einschließlich der Argumentationen zu den Komplexitätsgraden verwiesen.

²⁴⁸ Vgl. Ruhl (2016): Entwicklung eines Baulogistikprozessmodells, S. 115 ff.

²⁴⁹ Vgl. Ruhl (2016): Entwicklung eines Baulogistikprozessmodells, S. 122 ff.

Die Einordnung der einzelnen Baulogistikattribute in die o. g. Bewertungsskala von 0 bis 5 Punkte innerhalb des Entscheidungsnetzes ermöglicht eine dokumentierte Entscheidung zur Einrichtung und zum Umfang einer Fachplanung Baulogistik:²⁵⁰

Baulogistikattribute mit keiner bis geringer Komplexität (0 bis 2 Punkte) erfordern keine gesonderten Planungsleistungen und haben keinen oder nur einen sehr geringen Einfluss auf die Projektzielgrößen Kosten, Termine und Qualität. Der Objektplaner übernimmt die erforderliche geringfügige Betrachtung dieser Baulogistikattribute im Projektkontext im Rahmen des Planungsauftrags der Grundleistungen nach HOAI.

Baulogistikattribute mit einer durchschnittlichen Komplexität (3 Punkte) bedürfen auf Initiative des Objektplaners einer Abstimmung mit der Bauherrschaft oder dem Projektsteuerer. Es ist gemeinsam zu besprechen und festzulegen, inwiefern der Objektplaner diese Baulogistikattribute über die Grundleistung hinaus als zusätzliche Leistung bearbeiten soll oder ob hierfür ein Baulogistikplaner eingebunden wird. Die zusätzlichen Kosten der Objekt- oder Baulogistikplanung können durch die positiven Auswirkungen respektive die Risikoreduzierung im Kontext der Kosten, Termine und Qualitäten auf Grund der zusätzlichen Planung gerechtfertigt werden.

Bei Baulogistikattributen mit einer hohen bis sehr hohen Komplexität (4 bis 5 Punkte) werden die Bauherrschaft oder der Projektsteuerer seitens des Objektplaners darauf hingewiesen, dass diese Baulogistikattribute gesonderte Planungsleistungen durch einen Baulogistikplaner erfordern. Diese Leistungen können zusätzliche Leistungen gemäß HOAI sein oder darüber hinausgehen und sich bspw. am Leistungsbild des AHO Hefts Nr. 25 orientieren. Die Kosten-, Termin- und Qualitätssicherheit und das Projektrisiko hängen maßgeblich von diesen Baulogistikattributen ab. Aus dem Genehmigungsprozess ergeben sich Anforderungen an diese Baulogistikattribute. Deren hohe Relevanz rechtfertigt die zusätzlichen Kosten der Baulogistikplanung.

Die Bewertung der baulogistischen Komplexität erfolgt grundsätzlich auf der Ebene des einzelnen Baulogistikattributs. Die Visualisierung ermöglicht gleichwohl die Einordnung der baulogistischen Komplexität auf der Gesamtprojektebene. Die durch die Verbindung der Auswertungspunkte entstehenden Flächen können zueinander in Verhältnis gesetzt werden und Rückschlüsse über die baulogistische Komplexität des Gesamtprojekts liefern. Je geringer das Verhältnis der dunkelgrauen Fläche zur Gesamtfläche im Entscheidungsnetz ist, desto zielführender ist die Integration einer Fachplanung Baulogistik in das Gesamtprojekt. Hellgraue Flächen geben einen Hinweis darauf, ob für die zielführende Projektabwicklung im Kontext der Kosten-, Termin- und Qualitätsziele baulogistische Leistungen erforderlich werden, die über die Grundleistungen der Objektplanung nach HOAI hinausgehen. Die Argumentation

²⁵⁰ Vgl. Ruhl (2016): Entwicklung eines Baulogistikprozessmodells, S. 120 ff.

bezüglich der zusätzlichen Kosten folgt den o. g. Ausführungen zu den einzelnen Baulogistikattributen. Darüber hinaus können Synergieeffekte realisiert werden, wenn die Fachplanung Baulogistik mehrere Baulogistikattribute bearbeitet.²⁵¹

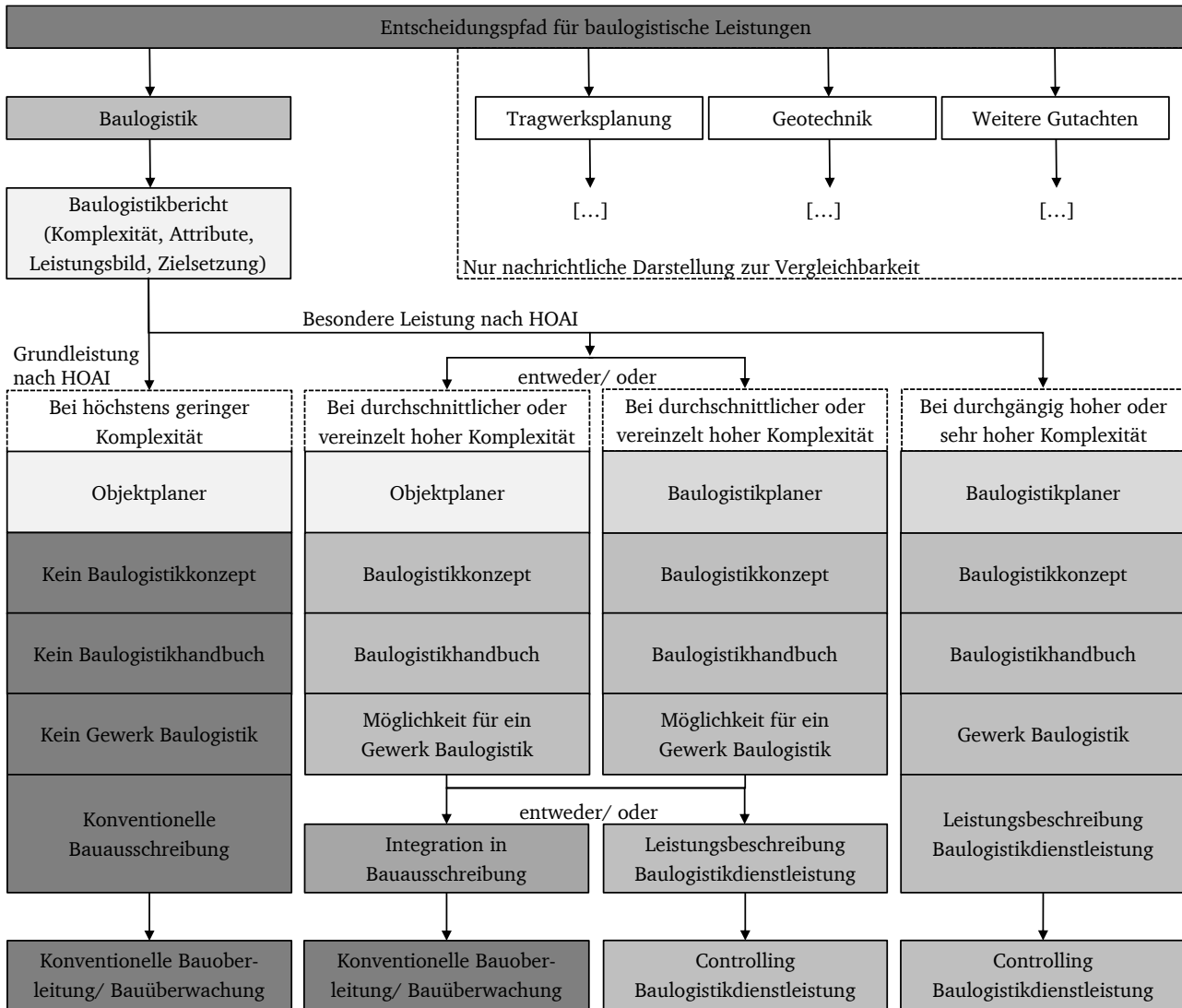


Abbildung 17: Organisationsformen der baulogistischen Leistungen²⁵²

Abbildung 17 zeigt in Abhängigkeit zur baulogistischen Komplexität die projektspezifisch unterschiedlichen Organisationsformen der baulogistischen Leistungen und fasst die vorherigen Ausführungen hinsichtlich der Entscheidung zur Einrichtung sowie dem Umfang einer Fachplanung Baulogistik zusammen. Bei geringer baulogistischer Komplexität ist es nicht erforderlich ein Baulogistikkonzept oder -handbuch zu erstellen. Die Objektplanung integriert die baulogistischen Anforderungen in die Baubeschreibung und die Vergabe von baulogistischen

²⁵¹ Vgl. Ruhl (2016): Entwicklung eines Baulogistikprozessmodells, S. 121 f.

²⁵² In Anlehnung an Ruhl et al. (2018): Baulogistikplanung, S. 32

Leistungen entfällt. Bei einer durchschnittlichen oder vereinzelt hohen baulogistischen Komplexität ist ein Baulogistikkonzept und -handbuch zu erstellen. Es ist zu entscheiden, ob diese Leistungen durch den Objektplaner oder durch eine Fachplanung Baulogistik zu erbringen sind. Bei durchgängig hoher bis sehr hoher baulogistischer Komplexität ist die Instanz einer Baulogistikplanung einzurichten. Diese Instanz stimmt die Baulogistikleistungen mit der Bauherrschaft ab und kann durch eine Abteilung der Bauherrenorganisation oder durch ein externes Unternehmen im Projekt abgebildet werden. Es erfolgt eine präzise Zuordnung der Baulogistikleistungen zu den Leistungserbringern verbunden mit angemessenen Vergütungsregeln und der Initiierung eines Gewerks Baulogistik. Während der Baulogistikrealisierungsphase ist zur Steuerung und Überwachung ein adäquates Baulogistikcontrolling einzurichten.²⁵³

In der Einleitung wird als Ziel der vorliegenden Arbeit die Entwicklung eines Baustellenversorgungssystems über ein Warenverteilzentrum im Sinne eines Supply-Chain-Managements im Bauwesen formuliert. Dieses Baustellenversorgungssystem ist in das vorgestellte Baulogistikprozessmodell zu integrieren. Hierzu ist das Baulogistikprozessmodell zu ergänzen und zu erweitern. Die Integration des Baustellenversorgungssystems in das Baulogistikprozessmodell sowie weitere damit verbundene Präzisierungen, Erweiterungen und Anpassungen des Baulogistikprozessmodells erfolgen in Kapitel 5.

²⁵³ Vgl. Ruhl et al. (2018): Baulogistikplanung, S. 31 f.

2.3 Lean Logistics

Zu Beginn des folgenden Unterkapitels wird zur Einführung eine Übersicht zu den Begriffsdefinitionen und den Entwicklungen der verschiedenen Lean-Ansätze gegeben. Diese allgemeine Übersicht wird vor dem Hintergrund der vorliegenden Arbeit durch eine Darstellung zu den Ansätzen und Auswirkungen einer Lean Logistics innerhalb der Logistik sowie der Baulegistik konkretisiert.

2.3.1 Begriffsdefinitionen und Entwicklungen der Lean-Ansätze

Im Kontext des Begriffs Lean sind verschiedene Ansätze und Ausrichtungen zu erläutern und voneinander abzugrenzen. Hierzu zählen das Lean Management, die Lean Production, die Lean Construction sowie die Lean Logistics. Die Grundsätze dieser Lean-Ansätze lassen sich auf abstrakter Ebene als Lean Thinking zusammenfassen und können durch die von WOMACK/JONES definierten Prinzipien beschrieben werden. Diese Prinzipien sind die Spezifikation des Werts²⁵⁴, die Identifikation des Wertstroms²⁵⁵, das Flussprinzip²⁵⁶, das Pull-Prinzip²⁵⁷ sowie das Streben nach Perfektion²⁵⁸.

Die Grundlage der Entwicklung der o. g. Lean-Ansätze sind die Veränderungen von der handwerklichen bis hin zu einer industriellen Fertigung. Hier sind als wegweisend die Konzepte von Frederic Winslow Taylor und Henry Ford hervorzuheben. TAYLOR forcierte auf Basis von Arbeitsstudien die Prinzipien der Arbeitsteilung sowie die Standardisierung im Produktionsprozess. FORD etablierte die Fließbandarbeit.²⁵⁹

Der Ursprung aller Lean-Ansätze liegt in dem von Taiichi Ohno entwickelten Toyota-Produktionssystem. OHNO²⁶⁰ greift auf die Konzepte der Massenproduktion von TAYLOR und FORD in Form der Arbeitsteilung und Standardisierung zurück und ergänzt diese mit dem JIT-Prinzip um eine Vermeidung von Material- und Halbfertigteillagerungen respektive -pufferungen zu erzielen.²⁶¹ Der Kern des TPS und damit verbunden die Steigerung der Wirtschaftlichkeit der Produktion ist das Erkennen, das Reduzieren und bestenfalls die vollständige Eliminierung von nicht unmittelbar wertschöpfenden Tätigkeiten im Produktionsprozess aus Sicht des Kunden.²⁶² Diese Verschwendungen im Produktionsprozess können den Kategorien Transport, Bestände, Bewegung, Wartezeit, Überproduktion, falsche Wahl der Technologie

²⁵⁴ Vgl. Womack/Jones (2013): Lean Thinking, S. 24

²⁵⁵ Vgl. Womack/Jones (2013): Lean Thinking, S. 28 f.

²⁵⁶ Vgl. Womack/Jones (2013): Lean Thinking, S. 30 f.

²⁵⁷ Vgl. Womack/Jones (2013): Lean Thinking, S. 34 f.

²⁵⁸ Vgl. Womack/Jones (2013): Lean Thinking, S. 36 f.

²⁵⁹ Vgl. Lange (2017): Die Organisation einer flussorientierten Baulegistik für den Ausbau, S. 43

²⁶⁰ Ohno (2009): Das Toyota-Produktionssystem

²⁶¹ Vgl. Kirsch (2009): Organisation der Bauproduktion nach dem Vorbild industrieller Produktionssysteme, S. 19

²⁶² Vgl. Ohno (2009): Das Toyota-Produktionssystem, S. 26

oder des Prozesses sowie fehlerhafte Produkte, Ausschuss oder Nacharbeit zugeordnet werden.²⁶³ Weitere Basiselemente des TPS sind der Respekt für den Menschen und die kontinuierliche Verbesserung. Durch den Respekt für das Gegenüber wird eine Vertrauensbasis geschaffen und die Zusammenarbeit gefördert. Dies führt zu einer Maximierung der Potenziale jedes Mitarbeitenden und somit zu einem Leistungszuwachs aller Beteiligten. Durch die Suche nach innovativen Lösungen und neuen Kundenwerten im Sinne eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses werden die Prozesse des Unternehmens fortlaufend verbessert.²⁶⁴

Der Begriff der Lean Production ist auf eine Untersuchung von KRAFCIK²⁶⁵ zurückzuführen. Er untersuchte und verglich die japanischen Produktionsmethoden mit der westlichen Automobilindustrie. Es wurde der Begriff lean, als schlankes Produktionssystem als Gegensatz zu buffered, als gepuffertes Produktionssystem geprägt. Das TPS entspricht durch die o. g. Prinzipien einem schlanken Produktionssystem. Lean Production ist daher nicht als Konzept mit theoretischem Rahmen, sondern vielmehr als Zustandsbeschreibung des TPS zu verstehen. Die Überführung und Anwendung der Ansätze der Lean Production auf alle Geschäftsprozesse eines Unternehmens wird dementsprechend als Lean Management beschrieben.²⁶⁶

Die Adaption der Lean-Philosophie auf das Bauwesen wird als Lean Construction bezeichnet. Eine Herausforderung bei der Übertragung stellen der Unikatcharakter eines Bauprojekts sowie die deutlich variableren Randbedingungen der Bauproduktion im Vergleich zur stationären Industrie und Produktion dar. Die für die Lean-Philosophie erforderlichen repetitiven Prozesse können aber dennoch bei einem Großteil der Bauprozesse festgestellt werden, erfordern aber spezifische Instrumente zur Anwendung der Lean-Philosophie in der Bauindustrie.²⁶⁷ Neben der Strukturierung der Wertschöpfungskette und der partnerschaftlichen Zusammenarbeit stellt die Verschwendungsreduzierung einen wesentlichen Aspekt bei der Anwendung der Lean-Philosophie in der Bauindustrie dar.²⁶⁸ In Anlehnung an OHNO werden als operative Verschwendung auf der Baustelle die Verschwendungsarten Bestände, Flächen, Wartezeit, Fehler/Mängel, Transport, Wege sowie Überproduktion definiert.²⁶⁹ Um die genannten Verschwendungsarten zu eliminieren oder zumindest zu reduzieren sowie die Prozesse der Bauproduktion zu stabilisieren, wurden zur Übertragung der Lean-Philosophie auf das Bauwesen verschiedene Modelle und Konzepte entwickelt. Ausgangspunkt dieser Entwicklungen ist das von KOSKELA²⁷⁰ formulierte TFV-Modell. Er rückt die Transformation

²⁶³ Vgl. Fiedler (2018): Das Toyota-Production-System – TPS, S. 52

²⁶⁴ Vgl. Fiedler (2018): Das Toyota-Production-System – TPS, S. 46

²⁶⁵ Krafcik (1988): Triumph of the Lean Production System

²⁶⁶ Vgl. Oeltjenbruns (2000): Organisation der Produktion nach dem Vorbild Toyotas, S. 13

²⁶⁷ Vgl. Motzko et al. (2013): Grundlagen des Bauprozessmanagements, S. 23

²⁶⁸ Vgl. Kaiser (2013): Lean Process Management in der operativen Bauausführung, S. 64

²⁶⁹ Vgl. Kaiser (2013): Lean Process Management in der operativen Bauausführung, S. 55 ff.

²⁷⁰ Koskela (1992): Application of the new production philosophy to construction

(T=Transformation), den Fluss (F=Flow) und die Wertschöpfung (V=Value) der Bauprozesse in den Mittelpunkt und integriert diese Aspekte in dem TFV-Modell. Die drei Gestaltungsaspekte sind dabei gleichwertig und erfordern eine intelligente Bauverfahrens- und Technologieauswahl zur Bauwerkserstellung unter gleichzeitiger Synchronisation des Ressourcen-, Material- und Informationsflusses verbunden mit dem Ziel, den maximalen Kundennutzen zu erreichen.²⁷¹ Das TFV-Modell stellt daher die allgemein anerkannte, theoretische Grundordnung bei der Übertragung der Philosophie des stationären Lean Managements auf das Bauwesen dar. Die grundlegenden Prinzipien der stationären Industrie werden wissenschaftlich abstrahiert und ermöglichen es, ein Bauprojekt als ein System aus Transformationen, Flüssen und Wertschöpfung zu definieren.²⁷² Weiterführende Informationen zu den dann folgenden Entwicklungsstufen der Lean Construction können KAISER²⁷³ entnommen werden. Darüber hinaus wird zur weiteren Vertiefung auf die VDI-Richtlinie 2553 Lean Construction²⁷⁴ verwiesen. In der Richtlinie werden u. a. neben Begriffsdefinitionen und Grundlagen zur Lean Construction auch die Gestaltungsprinzipien Kundenprinzip, Fließprinzip, Pull-Prinzip, Taktprinzip, Null-Fehler-Prinzip, kontinuierliche Verbesserung sowie Standardisierung und Vermeidung von Verschwendung aufgeführt und erläutert.²⁷⁵ Die Ausführungen zu den Gestaltungsprinzipien werden mit einem umfangreichen Methodenkatalog²⁷⁶ zur Umsetzung der Prinzipien in der Praxis unterstützt. Ergänzend hierzu kann die Veröffentlichung des GLCI²⁷⁷ zu Begriffen und Methoden der Lean Construction genannt werden.

Die Bauproduktion steht in einem engen baubetrieblichen Zusammenhang zu den logistischen Prozessen. Die baulogistischen Prozesse beeinflussen hierbei maßgeblich die Gestaltung der Produktionsprozesse. Dies führt dazu, dass auch die Logistik nach Lean-Ansätzen zu gestalten ist respektive die Lean Construction über den reinen Produktionsprozess hinaus durch logistische Lean-Ansätze, der Lean Logistics zu erweitern ist.²⁷⁸ In den folgenden Unterkapiteln werden daher zunächst die Ansätze und Auswirkungen einer Lean Logistics auf die grundständige Logistik beschrieben, um danach die relevanten Aspekte für die vorliegende Arbeit im Kontext der Ansätze und Auswirkungen einer Lean Logistics auf die Baulogistik zu thematisieren.

²⁷¹ Vgl. Kaiser (2013): Lean Process Management in der operativen Bauausführung, S. 69 f.

²⁷² Vgl. Kaiser (2013): Lean Process Management in der operativen Bauausführung, S. 79

²⁷³ Vgl. Kaiser (2013): Lean Process Management in der operativen Bauausführung, S. 64 ff.

²⁷⁴ VDI 2553 (2019): Lean Construction

²⁷⁵ Vgl. VDI 2553 (2019): Lean Construction, S. 9 ff.

²⁷⁶ Vgl. VDI 2553 (2019): Lean Construction, S. 38 ff.

²⁷⁷ GLCI (2019): Lean Construction

²⁷⁸ Vgl. Binder (2014): Ereignisbasierte Steuerung baulogistischer Prozesse mit Echtzeit-Ortungssystemen, S. 42

2.3.2 Ansätze und Auswirkungen einer Lean Logistics innerhalb der Logistik

Eine Vielzahl der Gestaltungsprinzipien der Lean-Ansätze respektive der Ansätze zur Verschwendungsreduzierung haben einen Bezug zu den logistischen Prozessen innerhalb der Wertschöpfungskette und können als schlanke Logistik, der Lean Logistics, zusammengefasst werden. Die Lean Logistics hat zum einen die Produktivitätsanforderung der Fertigung zu erfüllen und soll zum anderen durch kurze Durchlaufzeiten bei hoher Flexibilität zu strategischen Wettbewerbsvorteilen führen. Diese Ziele sind durch eine synchronisierte, flussorientierte und getaktete Logistik, die sich gegenläufig und nach dem Pull-Prinzip am Kundenbedarf orientiert, zu erreichen.²⁷⁹ Darüber hinaus erfordern die JIT- und JIS-Bereitstellung von Waren und Dienstleistungen schlanke Logistikprozesse.²⁸⁰ Die Notwendigkeit einer JIT- oder JIS-Bereitstellung resultiert aus der zunehmenden Erwartung der Individualisierung und der Flexibilität verbunden mit immer kurzfristigeren Lieferterminen. Um diese Erwartungen und Anforderungen zu erfüllen, sind eine durchgängige Lieferfähigkeit, geringe Lagerbestände, kleinste Losgrößen sowie eine hohe Flexibilität bei kurzfristigen, teilweise nicht vorhersehbaren Bedarfen anzustreben und durch Ansätze der Lean Logistics realisierbar.²⁸¹

Logistische Prozesse stellen für den Kunden keine Wertschöpfung dar, sind aber für die Erfüllung des Kundenwunsches und den damit verbundenen Prozessen nötig. Sie sind daher nicht wertschöpfend aber unvermeidbare Tätigkeiten, die zu reduzieren sind.²⁸² Andererseits entstehen entlang der Wertschöpfungskette vielfältige Kunden-Lieferanten-Beziehungen innerhalb sowie zwischen den Unternehmen und Produktionsstätten. Im Kontext von logistischen Prozessen bedeutet dies, dass der nachgelagerte Prozess der Kunde ist und dieser den Wert definiert, nach dem der Prozess auszurichten ist.²⁸³ Des Weiteren schaffen logistische Prozesse einen Teil des Servicewertes, den der Kunde neben dem Wert der Ware erwartet. Die Logistik sorgt dafür, dass der Kunde bspw. das richtige Produkt am richtigen Ort in der richtigen Menge und Qualität erhält. In diesem Zusammenhang sind die sieben Verschwendungsarten der Logistik – Überlieferung, Wartezeiten, überflüssige Transporte, undefinierte Prozesse, Bestände sowie unnötige Tätigkeiten und Fehler zu eliminieren oder zumindest zu reduzieren.²⁸⁴ Eine ausführliche Erläuterung zu den sieben Verschwendungsarten der Logistik kann DURCHHOLZ²⁸⁵ entnommen werden. Die folgende Abbildung zeigt schematisch die

²⁷⁹ Vgl. Klug (2018): Logistikmanagement in der Automobilindustrie, S. 288

²⁸⁰ Vgl. Boppert et al. (2013): Entwicklungsströme und Trends in der schlanken Prozessgestaltung, S. 11

²⁸¹ Vgl. Boppert et al. (2013): Entwicklungsströme und Trends in der schlanken Prozessgestaltung, S. 16

²⁸² Vgl. Günthner et al. (2013): Schlanke Logistikprozesse, S. 4

²⁸³ Vgl. Durchholz (2013): Zehn Leitlinien für eine schlanke Logistik, S. 45

²⁸⁴ Vgl. Günthner et al. (2013): Schlanke Logistikprozesse, S. 11 ff.

²⁸⁵ Vgl. Durchholz (2013): Zehn Leitlinien für eine schlanke Logistik, S. 46 f.

Zusammenhänge zwischen Kunden-, Waren- und Servicewert und die damit verbundenen Aufwände und Verschwendungen.

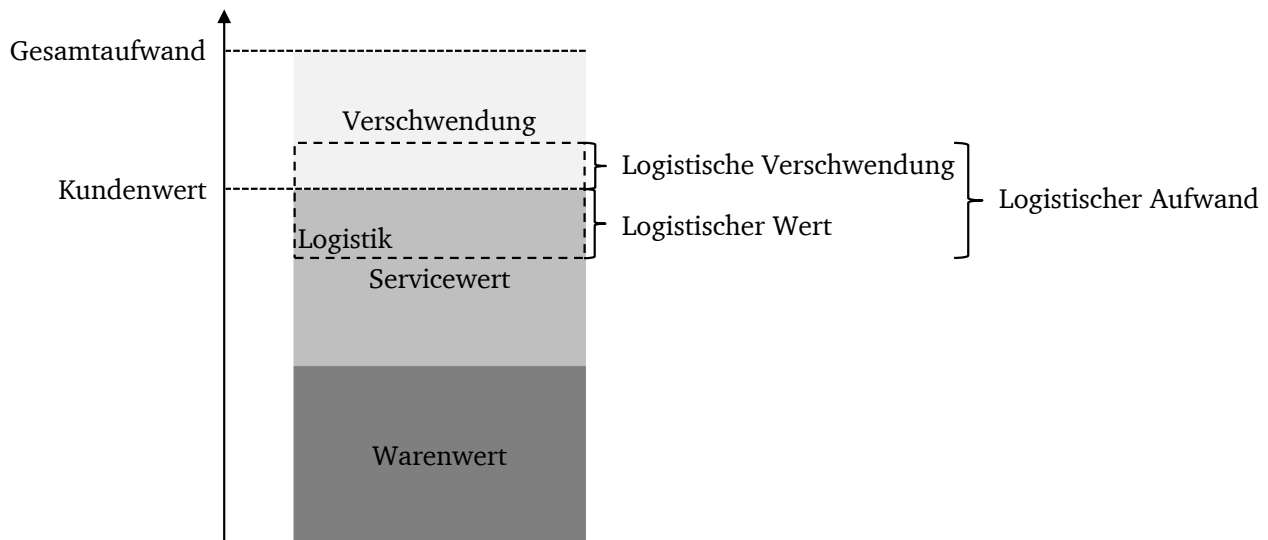


Abbildung 18: Kunden-, Waren- und Servicewert im Kontext der Lean Logistics²⁸⁶

Um zum einen die o. g. Erwartungen und Anforderungen zu erfüllen und zum anderen die Verschwendung in den logistischen Prozessen zu reduzieren oder am besten zu eliminieren, stehen zur Prozessgestaltung spezifische Prinzipien der Lean Logistics zur Verfügung. Als Resultat des Forschungsprojekts LEAN:log der TU München sind als Grundlage für die Gestaltung schlanker Logistikprozesse zehn Leitlinien publiziert. Diese Leitlinien sind „auf den Wert konzentrieren“, „am Wertstrom orientieren“, „Prozesse in Fluss bringen“, „ziehende Prozesse realisieren“, „Perfektion anstreben“, „Mitarbeiterpotenzial bewusst nutzen“, „Standards setzen“, „Langfristig denken“, „Prozesse robust gestalten“ sowie „in ganzheitlichen Prozessen denken“.²⁸⁷ Für eine ausführliche Erläuterung zu den zehn Leitlinien für eine schlanke Logistik wird auf DURCHHOLZ²⁸⁸ verwiesen. KLUG²⁸⁹ definiert auf Basis einer Vielzahl durchgeführter Praxisprojekte im Bereich der Automobilindustrie acht wiederkehrende Basisprinzipien einer schlanken Logistik. Im Vergleich zu den o. g. zehn Leitlinien für eine schlanke Logistik wird für die Benennung und die Erklärungen der Prinzipien teilweise eine andere Terminologie bei gleichem Inhalt verwendet. Es werden als Grundprinzipien einer schlanken Logistik die Synchronisation, der Takt, der Fluss, der Pull, der Standard, die Stabilität, sowie

²⁸⁶ In Anlehnung an Durchholz (2013): Zehn Leitlinien für eine schlanke Logistik, S. 45

²⁸⁷ Vgl. Günthner et al. (2013): Schlanke Logistikprozesse, S. 11 ff.

²⁸⁸ Durchholz (2013): Zehn Leitlinien für eine schlanke Logistik

²⁸⁹ Klug (2018): Logistikmanagement in der Automobilindustrie

die Integration und die Perfektion beschrieben.²⁹⁰ Für eine ausführliche Erläuterung zu diesen acht Grundprinzipien einer schlanken Logistik wird auf KLUG²⁹¹ verwiesen.

Zur Realisierung einer schlanken Logistik können auf Basis der vorgestellten Grundprinzipien sowie einer Line-Back-Planung²⁹² und einer Logistknivellierung und -glättung²⁹³ am Beispiel der Automobilindustrie, verschiedene Gestaltungsprinzipien erkannt werden. Diese können in die Bereiche Arbeitsplatz, Materialabruf, Materialanstellung, interner Transport, interner Umschlag/Lagerung, externer Transport sowie externer Umschlag/Lagerung und Lieferant unterteilt werden. Als Systematisierung der Gestaltungsprinzipien dient das Prinzipienhaus der schlanken Logistik nach KLUG. Das Prinzipienhaus der schlanken Logistik verdeutlicht die Auswirkungen der Lean-Philosophie auf die internen und externen Logistikprozesse der stationären Industrie am Beispiel der Automobilindustrie und fasst diese zusammen. Detaillierte Erläuterungen zu jedem Gestaltungsprinzip können KLUG²⁹⁴ entnommen werden. Als Ergänzung sowie für weitere Erläuterungen zu den Gestaltungsprinzipien im Kontext der internen und externen Logistik, dem Lieferanten sowie dem Informationsfluss und der Materialsteuerung wird auf SCHNEIDER²⁹⁵ verwiesen.

²⁹⁰ Vgl. Klug (2018): Logistikmanagement in der Automobilindustrie, S. 290

²⁹¹ Vgl. Klug (2018): Logistikmanagement in der Automobilindustrie, S. 288 ff.

²⁹² Ausgangspunkt des Line-Back-Planungsprinzips ist der Verbrauchsort des Materials, der Arbeitsplatz. Alle logistischen Prozesse werden retrograd vom Arbeitsplatz über die internen und externen Materialflüsse bis hin zum Lieferanten geplant. Vgl. Klug (2018): Logistikmanagement in der Automobilindustrie, S. 88

²⁹³ Zur Beseitigung von Schwankungen und Unterbrechungen innerhalb der Logistikprozesse erfordern schlanke Logistikprozesse ein geglättetes und nivelliertes Produktionsprogramm. Hierzu ist das Produktionsprogramm kurzfristig von der Kundennachfrage entkoppelt. Vgl. Klug (2018): Logistikmanagement in der Automobilindustrie, S. 294

²⁹⁴ Vgl. Klug (2018): Logistikmanagement in der Automobilindustrie, S. 296 ff.

²⁹⁵ Vgl. Schneider (2016): Lean Factory Design, S. 179 ff.

2.3.3 Ansätze und Auswirkungen einer Lean Logistics innerhalb der Baulogistik

Im vorherigen Kapitel wurden die Ansätze und Auswirkungen einer Lean Logistics innerhalb der Logistik dargelegt. Durch schlanke Logistiksysteme werden u. a. eine Reduzierung der nicht wertschöpfenden Tätigkeiten sowie eine Verbesserung der Schnittstellen innerhalb der logistischen Prozesskette im Produktionsprozess angestrebt. Neben den innerbetrieblichen Logistikprozessen stehen hierbei die damit eng verknüpften außerbetrieblichen Logistikprozesse im Fokus. Es ist daher anzustreben, nicht nur die Produktions- und innerbetrieblichen Logistikprozesse bestmöglich aufeinander abzustimmen, sondern gleichwohl die Prozesse der inner- und außerbetrieblichen Logistik.

In verschiedenen Untersuchungen zeigt sich, dass ein erheblicher Verschwendungsanteil auf Baustellen einen Bezug zu baulogistischen Prozessen hat. KAISER²⁹⁶ stellt fest, dass innerhalb eines achtstündigen Arbeitstages durchschnittlich eineinhalb Stunden für Wege, die hauptsächlich mit Suchaufwendungen und zusätzlichem Abstimmungsbedarf in Zusammenhang stehen, aufgewendet werden. Nach BLÖMEKE²⁹⁷ werden im Schlüsselfertigbau 31 % der Arbeitszeit für Haupttätigkeiten aufgewendet. Die übrigen 69 % der Arbeitszeit bestehen aus Neben- sowie Zusatztätigkeiten und weisen dabei einen hohen Anteil an baulogistischen Prozessen auf. Diese Prozesse sind im Besonderen Wege- und Transportzeiten sowie Such- und Räumvorgänge. GUNTERMANN²⁹⁸ formuliert in ihrer Diplomarbeit, dass ein Drittel der Tätigkeiten auf Baustellen durch baulogistische Maßnahmen beeinflussbar respektive von der Baulogistik abhängig sind.

Um den Anteil der Haupttätigkeiten zu erhöhen und damit verbunden den Verschwendungsanteil zu reduzieren sowie die o. g. Abstimmung innerhalb der außer- und innerbetrieblichen logistischen Prozesse und derselbigen mit den Produktionsprozessen zu verbessern, gilt es die Potenziale einer Lean Logistics auf Baustellen zu aktivieren. Hierbei stehen bei der Umsetzung der Lean Logistics auf Baustellen die Ziele der Produktivitätsmaximierung, die stringente Orientierung der Wertschöpfung am Kundenbedarf sowie die Defragmentierung der baulogistischen Prozesse entlang der gesamten Lieferkette durch klare Schnittstellen im Fokus.²⁹⁹

Baulogistische Prozesse sind analog zur grundstätigen Logistik als Supportprozesse zu verstehen.³⁰⁰ Diese Supportprozesse erzeugen per Definition keine direkte Wertschöpfung für

²⁹⁶ Vgl. Kaiser (2013): Lean Process Management in der operativen Bauausführung, S. 58

²⁹⁷ Vgl. Blömeke (2001): Die Baustellenlogistik als neues Dienstleistungsfeld im Schlüsselfertigbau, S. 77

²⁹⁸ Vgl. Guntermann (1997): Schlüsselfertiges Bauen – Logistik im Ausbau bei schlüsselfertiger Bauausführung, S. 86 ff.

²⁹⁹ Vgl. Binder (2014): Ereignisbasierte Steuerung baulogistischer Prozesse mit Echtzeit-Ortungssystemen, S. 48

³⁰⁰ Vgl. Motzko (2020): Baulogistik, S. 594

den Kunden, sind aber für die Umsetzung der Kernprozesse notwendig.³⁰¹ Im Bauwesen definieren somit die ausführenden Gewerke, als interne Kunden, den Wert der Baulogistik. Innerhalb der Leistungserstellungsprozesse schafft die Baulogistik einen Kundenwert für die ausführenden Gewerke. Dieser Kundenwert respektive diese Wertschöpfung entstehen durch eine baulogistische Prozesskette, die nach Prinzipien der Lean-Philosophie zu gestalten ist.

Zur Erreichung der o. g. Ziele sowie zur Gestaltung der baulogistischen Prozesskette sind verschiedene Prinzipien mit einem branchenspezifischen Inhalt für eine Lean Logistics im Bauwesen publiziert. Diese werden im Folgenden erläutert.

- Fluss der Wertschöpfung: Nicht wertschöpfenden Tätigkeiten aus Sicht der Produktion in Form von Verschwendungen innerhalb der baulogistischen Prozesskette wie bspw. Flächen, Bestände, Wartezeiten, Wegezeiten, Leerfahrten, Transporte oder Materialverluste sind zu reduzieren. Hierzu sind die baulogistischen Prozesse hinsichtlich der durch die Produktion definierten baulogistischen Anforderungen zu untersuchen und ggf. durch veränderte Prozessstrukturen anzupassen.^{302, 303}
- Taktung der Systemkapazitäten: Die Taktung der Produktionsprozesse stellt eine kontinuierliche und gleichmäßige Auslastung der einzelnen Produktionsressourcen sicher und ermöglicht einen konstanten Wertfluss mit repetitiven Arbeiten. Die baulogistischen Prozesse sind auf Basis entsprechender Informationen exakt an dieser Taktung und somit an den einzelnen Produktionsprozessen auszurichten. Es wird ein Versorgungstakt initiiert und realisiert. Der Produktionsprozess, als eigentliche wertschöpfende Tätigkeit, darf keinesfalls durch Logistikprozesse behindert werden.³⁰⁴
- Pull des Wertes: Die Versorgung der Baustelle hat produktionssynchron im Sinne einer JIT- oder JIS-Anlieferung sowie durch einen gezogenen Wertfluss zu erfolgen. Durch die Taktung der Produktionsprozesse kann eine bedarfsgerechte Anlieferung realisiert werden und das Pull-Prinzip über den Produktionsprozess hinaus auch bei Baulogistikprozessen Anwendung finden. Dies führt zu einer Synchronisation und Taktung der Produktions- und Baulogistikprozesse mit der Folge, dass baulogistische Prozesse durch Produktionsprozesse direkt oder indirekt ausgelöst und in den Wertfluss gezogen werden. Es entstehen fertigungssynchrone Baulogistikprozesse. Hierbei erhöht das Pull-Prinzip die Effizienz der baulogistischen Prozesse des Transports, des Umschlags sowie der Lagerung und reduziert die Komplexität dieser Prozesse. Darüber hinaus wird durch eine Versorgung der Baustelle ohne örtliche Lagerhaltung auf der

³⁰¹ Vgl. Motzko et al. (2013): Grundlagen des Bauprozessmanagements, S. 8

³⁰² Vgl. Binder (2014): Ereignisbasierte Steuerung baulogistischer Prozesse mit Echtzeit-Ortungssystemen, S. 46

³⁰³ Vgl. Binder (2014): Ereignisbasierte Steuerung baulogistischer Prozesse mit Echtzeit-Ortungssystemen, S. 49

³⁰⁴ Vgl. Binder (2014): Ereignisbasierte Steuerung baulogistischer Prozesse mit Echtzeit-Ortungssystemen, S. 46 f.

Baustelle die benötigte Baustelleneinrichtungsfläche reduziert. Das Pull-Prinzip erfordert dabei einen umfassenden zeitnahen und unternehmensübergreifenden Informationsaustausch zwischen Produktion und Logistik. Zusammenfassend führt das Pull-Prinzip u. a. zu einer Reduktion der Durchlaufzeiten, der Wartezeiten, der Lagerbestände und -zeiten, der Transportressourcen sowie der zeitlichen Puffer innerhalb der gesamten baulogistischen Prozesskette.^{305, 306}

- **Streben nach Perfektion:** Der kontinuierliche Verbesserungsprozess in der Baulogistik ist auf die Aspekte Schnelligkeit, Kosten, Qualität, Flexibilität und Zuverlässigkeit im Sinne eines fehlerfreien Wertflusses abzustellen. Diese Aspekte sind einer Leistungskontrolle anhand einer Ermittlung und Bewertung von logistischen Prozesskenngrößen zu unterziehen. Als Prozesskenngrößen können Durchlaufzeiten, Reaktionsgeschwindigkeiten, Ressourcenauslastungen und Kosten dienen. Hierzu müssen sowohl Lieferanten als auch ausführenden Unternehmen Informationen teilen.³⁰⁷
- **Retrograde Planung des Bestellzeitpunkts:** Zur bedarfsgerechten Lieferung der Materialien erfolgt eine Rückwärtsterminierung des Bestellzeitpunkts gemäß Line-Back-Planungsprinzip. Durch eine Line-Back-Planung ist es möglich, die logistische Versorgungskette in ihre einzelnen Prozessschritte zu unterteilen und diese auf Basis der Lean-Ansätze zu gestalten.³⁰⁸ Dies führt zu einem stufenweisen Abbau der Bestände sowie einer Orientierung der Baulogistik an dem Bedarf des Verbauorts.³⁰⁹
- **Durchgängiger Informationsfluss:** Die Informationsflüsse und damit verbunden die Material- und Wertflüsse entlang des Gesamtprozesses vom Endkunden bis zum Vorlieferanten sind durch ein medienbruchfreies Informations- und Kommunikationssystem sicherzustellen. Hierfür sind neuartige Technologien einzusetzen.³¹⁰

Das Pull-Prinzip besitzt im Kontext der Lean Logistics auf Baustellen eine besondere Relevanz.³¹¹ Zur konkreten Umsetzung der mit dem Pull-Prinzip eng verknüpften JIT- und JIS-Anlieferungen existieren verschiedene Möglichkeiten, die sich teilweise gegenseitig bedingen. KAISER³¹² formuliert für eine JIT-Anlieferung oder eine verbrauchsgesteuerte Lagerung das Supermarktprinzip sowie für die Sicherstellung der Materialverfügbarkeit ein Tafelsystem mit Informationen zu deren Status. Des Weiteren wird für die externe Lagerung und den externen Umschlag und damit verbunden der JIT-Versorgung der Baustelle die Einrichtung

³⁰⁵ Vgl. Binder (2014): Ereignisbasierte Steuerung baulogistischer Prozesse mit Echtzeit-Ortungssystemen, S. 47 ff.

³⁰⁶ Vgl. Kaiser (2013): Lean Process Management in der operativen Bauausführung, S. 98

³⁰⁷ Vgl. Binder (2014): Ereignisbasierte Steuerung baulogistischer Prozesse mit Echtzeit-Ortungssystemen, S. 50

³⁰⁸ Vgl. Kaiser (2013): Lean Process Management in der operativen Bauausführung, S. 127 f.

³⁰⁹ Vgl. Porsche Consulting (2020): Lean Construction: Schlanke Baulogistik, Präsentationsfolien 13 und 29

³¹⁰ Vgl. Kaiser (2013): Lean Process Management in der operativen Bauausführung, S. 130 f.

³¹¹ Vgl. Kaiser (2013): Lean Process Management in der operativen Bauausführung, S. 131

³¹² Vgl. Kaiser (2013): Lean Process Management in der operativen Bauausführung, S. 128 ff.

und Nutzung eines Logistikzentrums diskutiert. KIRSCH³¹³ beschreibt zur Umsetzung einer JIT-Logistik ebenfalls die Ansätze des Logistikzentrums, die Anwendung des Supermarktprinzips sowie die Steuerung des Materialverfügbarkeitsstatus über Kanban-Systeme. Außerdem wird im Kontext des Logistikzentrums der Aspekt der Routenverkehre thematisiert. Auch LANGE³¹⁴ und SOMMER³¹⁵ verknüpfen das JIT-Prinzip mit der Einbindung eines Logistikzentrums, einem Pendelverkehr sowie einer Materialsteuerung über Tafelsysteme auf der Baustelle. Die beschriebenen Werkzeuge und Ansätze werden ebenso in der Beratungspraxis³¹⁶ sowie in spezifischen Lean-Arbeitsgruppen³¹⁷ aufgegriffen. Auf den Ansatz der Warenverteiltzentren in der Bauindustrie wird in Kapitel 3.2.2 eingegangen. Der Vollständigkeit halber werden an dieser Stelle das Supermarktprinzip, Tafel- respektive Kanban-Systeme zur Materialsteuerung sowie Routen- und Pendelverkehre im Kontext der Baulogistik erläutert.

Das Supermarktprinzip beschreibt einen Lagerbereich, der durch das Pull-Prinzip bewirtschaftet wird und bei dem die entnommenen Mengen über ein Kanban-System aufgefüllt werden. Im Supermarkt werden Verbrauchsmaterialien zentral auf der Baustelle gepuffert. Außerdem sorgt der Supermarkt durch die in der Regel verbrauchsnahe Verortung für eine zügige Versorgung von kleineren Mengen in regelmäßigen zeitlichen Abständen. Über das Kanban-System kann eine bedarfsgerechte und einfache Beschaffung von Verbrauchs- und kleinteiligen Lagermaterialien vom Lieferanten zum Logistikzentrum sowie vom Logistikzentrum zum Materialbereitstellungsort ermöglicht und gesteuert werden. Hierzu wird der vorgelagerte Prozess durch ein Kanban (japanisch für Karte, Zettel oder Tafel) aufgefordert, neues Material anzuliefern, wenn dieses benötigt wird. Die Kanban-Karte enthält Informationen über das zu beschaffende Material und wird bei Bedarf an den vorgelagerten Prozess übergeben. Der Abruf über das Kanban-System erfolgt täglich. Hieraus resultiert eine kurze Vorhaltedauer von kleinen Mengen. Der Transport der Verbrauchs- und kleinteiligen Lagermaterialien wie bspw. Hilfs- und Betriebsstoffe erfolgt anschließend über Routenzüge. Hier kann zwischen internen und externen Routenzügen unterschieden werden. Interne Routenzüge bezeichnen den Transport zwischen Supermarkt und Verbrauchsort, externe Routenzüge den Transport zwischen Supermarkt und Logistikzentrum. Über die Routenverkehre können neben den Versorgungs- auch die Entsorgungsprozesse realisiert werden sowie darüber hinaus die verschiedenen Kanban-Karten gesammelt werden. Der interne oder externe

³¹³ Vgl. Kirsch (2009): Organisation der Bauproduktion nach dem Vorbild industrieller Produktionssysteme, S. 53, S. 73 und S. 92 ff.

³¹⁴ Vgl. Lange (2017): Die Organisation einer flussorientierten Baulogistik für den Ausbau, S. 81 f.

³¹⁵ Vgl. Sommer (2016): Projektmanagement im Hochbau, S. 158 f.

³¹⁶ Vgl. Porsche Consulting (2020): Lean Construction: Schlanke Baulogistik, Präsentationsfolien 30, 34 f. und 45

³¹⁷ Vgl. GLCI (2019): Lean Construction, S. 73 ff.

Routenzug pendelt dabei zwischen den verschiedenen Stationen nach einem festgelegten Fahrweg und einem definierten Zeitplan.^{318, 319}

Zusammenfassend können als Auswirkungen der Lean-Philosophie auf die Baulogistik die Bestrebungen nach produktionssynchronen Logistikprozessen festgehalten werden. Hiermit verbunden ist eine Dominanz des Pull- sowie des JIT- und JIS- Prinzips und daraus resultierend eine taktgerechte und zyklische Versorgung der Baustelle durch häufige Anlieferungen mit geringen Mengen und definierten Bestandsreichweiten. Es sind standardisierte Prozesse, eine personelle Trennung von handwerklichen und logistischen Tätigkeiten sowie eine Versorgung zu definierten Zeitpunkten anzustreben. Diese Aspekte sind bei der vorliegenden Arbeit im Zuge der Entwicklung des Baustellenversorgungssystems zu berücksichtigen. Dem in dieser Arbeit verfolgte schlanke Ansatz der Baulogistik wird in der Beratungspraxis³²⁰ ein traditioneller Ansatz gegenübergestellt, der durch seltene Anlieferungen großer Mengen und mit starken Schwankungen der Liefermengen charakterisiert wird.

³¹⁸ Vgl. GLCI (2019): Lean Construction, S. 74 ff.

³¹⁹ Vgl. Kirsch (2009): Organisation der Bauproduktion nach dem Vorbild industrieller Produktionssysteme, S. 73, S. 93 ff. und S. 214

³²⁰ Vgl. Porsche Consulting (2020): Lean Construction: Schlanke Baulogistik, Präsentationsfolien 15, 24 und 26

2.4 Digitalisierung

Im Rahmen dieses Unterkapitels kann auf Grund des komplexen Themenfelds der Digitalisierung keine ausführliche und vollumfängliche Darstellung zur Thematik erfolgen. Das folgende Unterkapitel soll vielmehr als eine kurze Übersicht der für die Arbeit wesentlichen Grundlagen dienen. Hierzu werden zunächst die Begriffsdefinitionen und Entwicklungen der Digitalisierung vorgestellt, um anschließend ausgewählte Auswirkungen der Digitalisierung auf die Logistik sowie den Baubetrieb zu verdeutlichen.

2.4.1 Begriffsdefinitionen und Entwicklungen der Digitalisierung

Als digitale Darstellung wird im Kontext der Signal- und Steuerungstechnik eine zahlenmäßige Folge von Ereignissen definiert, bei der die Folge nur die diskreten Werte 1 oder 0 annehmen kann. Der Übergang von 0 auf 1 respektive von 1 auf 0 wird als Bit bezeichnet. Digitale Signale führen dementsprechend zu einem unstetigen Verlauf. Aus analogen Signalen resultieren stetige Verläufe mit einem kontinuierlichen Wertebereich von $-$ bis $+$ ∞ .³²¹ Als Digitalisierung kann daraus abgeleitet die Möglichkeit verstanden werden, Signale in maschinenlesbarer, digitaler Form darzustellen und somit der elektronischen Datenverarbeitung oder Computersystemen zur Verfügung zu stellen.

Die Entwicklung der Digitalisierung und der daraus resultierende Einsatz digitaler Technologien können zu Veränderungen bei Abläufen und Prozessen führen. Auf Grund der Auswirkungen dieser Entwicklungen kann die Digitalisierung als die nächste Revolution der wirtschaftlichen und sozialen Verhältnisse betrachtet werden.³²² Ein einheitliches Verständnis sowie Definition des Begriffs der Digitalisierung konnte sich auf Grund der dynamischen Entwicklung bislang noch nicht durchsetzen. Im weiteren Verlauf werden die für die vorliegende Arbeit relevanten Ansätze dargestellt.

Nach GROSS/PFENNIG sind sich die Begriffe „Digitalisierung“ und „elektronische Datenverarbeitung“ sehr ähnlich. Der technologische Fortschritt und die sich dadurch ergebenden Möglichkeiten der Digitalisierung führen aktuell lediglich zu einem größeren Umfang der damit verbundenen Themen im Vergleich zu dem Zeitpunkt als die elektronische Datenverarbeitung Verbreitung gefunden hat.³²³ GROSS/PFENNIG definieren demzufolge Digitalisierung als *„die Optimierung bestehender Prozesse oder die Schaffung neuer Prozesse und Produkte durch den Einsatz moderner Informationstechnologien.“*³²⁴ Auch für BENDEL sind die Verän-

³²¹ Vgl. Karaali (2018): Grundlagen der Steuerungstechnik, S. 1 f.

³²² Vgl. Goger et al. (2018): Studie: Potenziale der Digitalisierung im Bauwesen, S. 3

³²³ Vgl. Groß/Pfennig (2019): Digitalisierung in Industrie, Handel und Logistik, S. 37

³²⁴ Groß/Pfennig (2019): Digitalisierung in Industrie, Handel und Logistik, S. 38

derungen im Kontext der Informationsverarbeitung und Kommunikation wesentliche Bestandteile der Digitalisierung. Er definiert diese als „*digitale Umwandlung und Darstellung bzw. Durchführung von Information und Kommunikation oder die digitale Modifikation von Instrumenten, Geräten und Fahrzeugen.*“³²⁵ Die in den beiden Definitionen angesprochenen Aspekte der Weiterentwicklung der Informationstechnologien in Verbindung mit der Verbesserung von bestehenden Prozessen oder die Schaffung neuer Prozesse sowie die digitale Umwandlung, Durchführung und Darstellung von Informations- und Kommunikationsprozessen, können als Ausgangspunkte für die o. g. nächste Revolution der wirtschaftlichen und sozialen Verhältnisse respektive für die vierte Stufe des Industrialisierungsprozesses interpretiert werden.

Die erste Stufe des Industrialisierungsprozesses beschreibt die Mechanisierung der Produktionsprozesse. Mit der Erfindung der Dampfmaschine beginnt das Maschinenzeitalter. Die Massenfertigung mit Hilfe von Fließbändern und elektrischer Energie führt zur zweiten Stufe des Industrialisierungsprozesses. Die dritte Stufe ist gekennzeichnet durch den Einsatz von Elektronik und Informationstechnologien zur weiteren Automatisierung und Informatisierung der Produktionsprozesse. Die aktuell vonstattengehende 4. Industrielle Revolution wird durch die Entwicklung von cyber-physischen Systemen geprägt. Die reale und die virtuelle Welt werden miteinander verbunden und vernetzt.^{326, 327}

Durch cyber-physische Systeme werden Maschinen, Lagersysteme und Betriebsmittel vernetzt. Diese intelligenten Maschinen, Lagersysteme und Betriebsmittel tauschen eigenständig Daten und Informationen aus, lösen Aktionen aus und steuern sich gegenseitig und selbstständig. Hierdurch können u. a. Produktionsprozesse, Materialverwendungen sowie das Lieferkettenmanagement verbessert werden. Es entstehen sogenannte Smart Factories mit intelligenten Produkten, die eindeutig identifizierbar sowie lokalisierbar sind und ihre Historie sowie aktuellen Zustand kennen. Die Produktionsprozesse werden vom Bestellvorgang bis zur Distributionslogistik mit den betriebswirtschaftlichen Prozessen im Unternehmen vernetzt und erlauben eine in Echtzeit steuerbare Wertschöpfungskette. Der Industrie 4.0 und den Smart Factories werden immense Potenziale zugesprochen. Hierzu zählen bspw. die durchgängige Transparenz der Produktion, die Berücksichtigung von individuellen Kundenwünschen, die rentable Produktion von Einzelstücken, die dynamische Gestaltung von Produktionsprozessen und damit verbunden die Möglichkeit zur kurzfristigen Reaktion bei Produktionsstörungen oder -ausfällen. Neben diesen produktionsspezifischen Aspekten führt die

³²⁵ Bendel (2019): 350 Keywords Digitalisierung, S. 62

³²⁶ Vgl. Huber/Kaiser (2017): Wie das Internet der Dinge neue Geschäftsmodelle ermöglicht, S. 18

³²⁷ Vgl. Kagermann et al. (2013): Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0, S. 5

Industrie 4.0 zu positiven Effekten bei der Ressourcen- und Energieeffizienz sowie durch intelligente Assistenzsysteme zu einer Entlastung der Arbeitskräfte und damit verbunden einer demografie-sensiblen und sozialen Arbeitsgestaltung.³²⁸

Die Entwicklung und fortschreitende Miniaturisierung von autonomen und leistungsfähigen Kleinstcomputern, die drahtlos untereinander und mit dem Internet verbunden sind, führen im Kontext der Industrie 4.0 zu einer Allgegenwärtigkeit der rechnergestützten Informationsverarbeitung und sind Grundlage für die o. g. cyber-physischen Systeme. Die Vernetzung von intelligenten Gegenständen wie bspw. Ressourcen, Informationen oder Objekten per Internet wird als Internet der Dinge und Dienste bezeichnet.³²⁹ Innerhalb cyber-physischer Systeme wird durch entsprechende Sensorik, Mikroelektronik, Kommunikationsmodule und Rechenleistung die Umwelt erfasst und die daraus resultierenden Daten gespeichert und ausgewertet. Als Beispiel für Objekte, die mit einer gewissen Intelligenz versehen und mit Informationstechnologie ausgestattet sind, kann der Einsatz von intelligenten Produkten, Produktionsmitteln oder ganzer Produktionsmaschinen genannt werden. Mit Hilfe von Aktoren wird ein Einwirken der cyber-physischen Systeme auf die physikalische Welt möglich. Die Kommunikation erfolgt über das o. g. Internet der Dinge und Dienste.^{330, 331}

³²⁸ Vgl. Kagermann et al. (2013): Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0, S. 5

³²⁹ Vgl. Kagermann et al. (2013): Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0, S. 17

³³⁰ Vgl. Bauernhansl (2014): Die Vierte Industrielle Revolution – Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma, S. 16

³³¹ Vgl. Siepmann/Graef (2016): Industrie 4.0 – Grundlagen und Gesamtzusammenhang, S. 23

2.4.2 Ausgewählte Auswirkungen der Digitalisierung auf die Logistik

Die Smart Logistics stellt einen Teil einer Smart Factory respektive eines cyber-physischen Systems dar. In Anlehnung an den Begriff der Industrie 4.0 kann die Digitalisierung der Logistikbranche als Logistik 4.0 bezeichnet werden. Logistik 4.0 bezeichnet dementsprechend die Informatisierung der Logistikbranche mit ihren Akteuren und Objekten. Durch die fortschreitende Informatisierung stehen zu den Akteuren und Objekten Informationen zu deren Eigenschaften und Zuständen digital zur Verfügung. Die Kommunikation dieser Eigenschaften und Zustände an die Umgebung sowie das Auslesen dieser Eigenschaften und Zustände durch die Umgebung, ermöglichen eine Vernetzung der Objekte mit der Umgebung.³³² Die logistischen Objekte sind miteinander vernetzt, tauschen untereinander Daten und Informationen aus und steuern sich selbstständig durch den Materialfluss.³³³

BOUSONVILLE grenzt die Logistik 4.0 und die Industrie 4.0 durch den Grad der Relevanz für das umgebende logistische System voneinander ab. Als Anwendungen der Industrie 4.0 werden bspw. intelligente Maschinenbedienoberflächen, digitale Abbildungen des Maschinenzustandes und des Produktionsprozesses sowie die werkstückgesteuerte Betriebsmittelanpassung und die Fern-Wartung von Maschinen genannt. Als Schnittstelle zwischen Industrie 4.0 und Logistik 4.0 kann die Informationsvernetzung zur Verbesserung der Materialflüsse in der Produktion respektive die Produktionslogistik definiert werden. Zu den Auswirkungen der Digitalisierung auf die Logistik respektive zu den wesentlichen Basistechnologien für die Anwendungen der Logistik 4.0 zählen die Identifikation und Ortung, die Sensorik, die Datenübertragungs- und Datenverarbeitungstechnologien, das Internet und das Cloud-Computing sowie Big Data und die Datenanalyse. Die Identifikation eines Objektes ist die Grundvoraussetzung um ein physisches Objekt und seinen aktuellen Zustand, wie bspw. den Ort, mit dem virtuellen Abbild verknüpfen zu können sowie einen Datenaustausch zu ermöglichen. Neben der Position des Objektes können über Sensoren auch Daten zu Temperatur, Druck, Füllstand oder Energieverbrauch erfasst und entsprechende Informationen generiert werden.³³⁴

HAUSLADEN systematisiert die Basistechnologien nach funktionsbezogenen und funktionsübergreifenden Informations- und Kommunikationstechnologien. Zu den funktionsbezogenen Technologien zählen die Lokalisierung, die Identifikation, die mobile Kommunikation sowie mobile Endgeräte der Informations- und Kommunikationstechnologie und der elektro-

³³² Vgl. Bousonville (2017): Logistik 4.0, S. 5

³³³ Vgl. Günthner et al. (2014): Adaptive Logistiksysteme als Wegbereiter der Industrie 4.0, S. 298

³³⁴ Vgl. Bousonville (2017): Logistik 4.0, S. 13 ff.

nische Datenaustausch. Den funktionsübergreifenden Informations- und Kommunikationstechnologien sind u. a. das Cloud-Computing und Analysemethoden zuzuordnen.³³⁵ Eine ausführliche Darstellung zu den Basistechnologien sowie deren einzelner Elemente kann HAUSLADEN³³⁶ entnommen werden.

Die konkreten Auswirkungen der Digitalisierung auf die Logistik sowie die realen Anwendungsfälle können unterschiedlich kategorisiert werden. Eine Möglichkeit ist nach BOUSONVILLE die grundsätzliche Differenzierung der Anwendungsfälle nach internem und externem Transport. Durch moderne Telematiklösungen werden neben der Position des Fahrzeugs weitere technische Daten wie bspw. Verbräuche, Geschwindigkeiten, Achslasten oder Tankfüllstände ermittelt und aufgezeichnet. Darüber hinaus können die Lenk- und Ruhezeiten des Fahrers erhoben werden. Eine kurzzyklische Übermittlung der Daten an die Server des Telematikbetreibers ermöglichen der Disposition oder Fuhrparkleitung ein verbessertes Flotten-, Fahrzeug-, Fahrer- und Ladungsmanagement. Ein weiterer Anwendungsfall innerhalb des externen Transports sind Frachtenbörsen. Über elektronische Marktplätze können Aufträge fremdvergeben werden oder zur Vermeidung von Leerfahrten bei Rückfahrten Fracht gesucht werden. Ein zukünftiges Anwendungsszenario des externen Transports stellt auf Grundlage der o. g. Basistechnologien das automatisierte Fahren dar.³³⁷

Im Kontext des Lagers und der internen Materialversorgung können als Anwendungsfälle intelligente Behälter und Ladungsträger identifiziert werden. Intelligente Behälter erfassen bspw. ihren Füllstand mittels Sensoren und lösen nach vorgegebenen Randbedingungen selbstständig Bestellungen aus. Der Behälter übernimmt somit eine manuelle und dispositive Tätigkeit des Menschen innerhalb der Materialwirtschaft. Sie ermöglichen darüber hinaus eine automatisierte Erfassung des Materialflusses in Echtzeit sowie eine Reduktion der Bestände. Analog zum automatisierten Fahren beim externen Transport ist ebenso die Entwicklung von fahrerlosen Transportsystemen und -robotern beim internen Transport festzustellen. Der Materialversorgungsprozess wird zukünftig automatisiert realisiert werden.³³⁸

Eine detailliertere Differenzierung vollzieht HAUSLADEN. Auf Basis der funktionalen Abgrenzung der Logistiksysteme werden die IT-gestützte Beschaffungs-, Produktions-, Lager-, Distributions- und Instandhaltungslogistik definiert. HAUSLADEN untersucht die Einflüsse der IT auf die einzelnen logistischen Subsysteme und stellt deren Auswirkungen auf die bestehenden Methoden, Konzepte und Instrumente dar. Innerhalb der Beschaffungslogistik etablieren sich u. a. IT-gestützte Supplier Relationship Management Systeme, elektronische

³³⁵ Vgl. Hausladen (2014): IT-gestützte Logistik, S. 52

³³⁶ Vgl. Hausladen (2014): IT-gestützte Logistik, S. 53 ff.

³³⁷ Vgl. Bousonville (2017): Logistik 4.0, S. 28 ff.

³³⁸ Vgl. Bousonville (2017): Logistik 4.0, S. 35 ff.

Marktplätze sowie Online-Shops und Webportale.³³⁹ Die Produktionslogistik verändert sich bspw. durch den Einsatz von IT-gestützten Konzepten zur Produktionsplanung und -steuerung oder der elektronischen Materialbedarfssteuerung.³⁴⁰ Die IT-gestützte Lagerlogistik ist u. a. zunehmend geprägt durch elektronische Kommissioniersysteme sowie vielfältige IT-gestützte Lagerverwaltungssysteme.³⁴¹ Der Distributionslogistik können durch die IT bspw. Veränderungen bei der Routen- und Tourenplanung, der Telematik sowie dem Tracking und Tracing zugeordnet werden. Des Weiteren ist eine Weiterentwicklung des Customer Relationship Management und damit in Beziehung stehender Systeme festzustellen.³⁴² Als Beispiel für die Auswirkung der IT in der Instandhaltungslogistik kann die Ferndiagnose und -wartung genannt werden. Im Kontext des unternehmensübergreifenden IT-gestützten Supply-Chain-Managements können vor allem Softwarelösungen identifiziert werden, die ursprünglich das intralogistische Umfeld unterstützt haben und zu unternehmensübergreifenden Anwendungen weiterentwickelt wurden. Hierzu zählen bspw. Enterprise Resource Planning-Systeme oder Logistikplattformen.³⁴³ Für eine vollumfängliche Darstellung aller Auswirkungen der IT und der Digitalisierung auf die Logistik sowie für Beschreibungen und Erläuterungen zu den einzelnen Auswirkungen wird auf HAUSLADEN³⁴⁴ verwiesen.

³³⁹ Vgl. Hausladen (2014): IT-gestützte Logistik, S. 84 ff.

³⁴⁰ Vgl. Hausladen (2014): IT-gestützte Logistik, S. 111 ff.

³⁴¹ Vgl. Hausladen (2014): IT-gestützte Logistik, S. 140 ff.

³⁴² Vgl. Hausladen (2014): IT-gestützte Logistik, S. 167 ff.

³⁴³ Vgl. Hausladen (2014): IT-gestützte Logistik, S. 216 ff.

³⁴⁴ Vgl. Hausladen (2014): IT-gestützte Logistik, S. 81 ff.

2.4.3 Ausgewählte Auswirkungen der Digitalisierung auf den Baubetrieb

Die folgenden Ausführungen geben einen Überblick über die Entwicklungen der Digitalisierung in der Bauindustrie. Hierbei ist anzumerken, dass es im Rahmen der vorliegenden Arbeit auf Grund des thematischen Umfangs nicht möglich ist, eine vollumfängliche und abschließende Darstellung aller Auswirkungen der Digitalisierung auf den Baubetrieb auszuarbeiten. Es sollen an dieser Stelle vielmehr exemplarisch Entwicklungen sowie Potenziale und Auswirkungen, die sich aus der Digitalisierung ergeben können vorgestellt werden. Einige dieser Potenziale dienen als Motivation, Anknüpfungspunkte sowie zur Einordnung der Forschungsergebnisse dieser Arbeit. Darüber hinaus soll mit den folgenden Beispielen dem stellenweise vermittelten Eindruck einer mangelnden Digitalisierung in der Bauindustrie^{345, 346, 347, 348} entgegengewirkt werden. Dieses Unterkapitel kann u. a. auch als kurzer Kommentar seitens des Verfassers hierzu interpretiert werden.

Bevor in diesem Kapitel exemplarische Auswirkungen der Digitalisierung auf den Baubetrieb thematisiert werden, ist an dieser Stelle herauszustellen, dass der Mensch trotz der neuen Methoden, Systeme und Modelle weiterhin unantastbar im Mittelpunkt steht. Der Mensch mit seinen konzeptionellen Fähigkeiten ist entscheidend für den Wert und die Aussagekraft von Simulationen sowie der wesentliche Faktor für erfolgswirksame Interpretationen und Schlussfolgerungen von Ergebnissen, die sich aus der Digitalisierung ergeben. Digitale Modelle bleiben ohne menschliche Handlungen stets unvollständig. Trotz der Digitalisierung ist auf Basis eines fundierten Systemverständnisses ein logisches Prozessdenken im Kontext der Planungs- und Bauprozesse nötig und nach wie vor unverzichtbar.³⁴⁹ Hierdurch wird die erforderliche sach- und fachgerechte Überprüfung der erzeugten Informationen durch den Menschen sichergestellt. Dieser ist durch die im Kontext der Digitalisierung erzeugten Informationen nicht ersetzbar, sondern erfährt vielmehr eine Unterstützung bei seinen Arbeitsaufgaben.³⁵⁰ Der Mensch steht somit trotz der Digitalisierung weiter im Mittelpunkt und bleibt das Maß aller Dinge. Er gestaltet und steuert weiterhin die relevanten Prozesse und trifft die hierzu wichtigen Entscheidungen.³⁵¹ Für die Entwicklung digitaler Prozessmodelle sind Kenntnisse über die baubetriebliche Relevanz von Daten unabdingbar.³⁵²

³⁴⁵ Vgl. Deutsche Telekom AG (2020a): Digitalisierungsindex Mittelstand 2020/2021. Der digitale Status quo des deutschen Mittelstands

³⁴⁶ Vgl. Deutsche Telekom AG (2020b): Digitalisierungsindex Mittelstand 2020/2021. Der digitale Status quo im deutschen Baugewerbe

³⁴⁷ Vgl. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (2019): Beitrag der Digitalisierung zur Produktivität in der Baubranche

³⁴⁸ Vgl. Roland Berger (2016): Digitalisierung der Bauwirtschaft

³⁴⁹ Vgl. Hofstadler (2019): Aktuelle Entwicklungen in Baubetrieb, Bauwirtschaft und Bauvertragsrecht, S. V f.

³⁵⁰ Vgl. Motzko (2010): Digitale Schnittstellen im Bauwesen, S. 38

³⁵¹ Vgl. Motzko (2008): IT-Simulation und Realität – Eine baubetriebliche Betrachtung, S. 73

³⁵² Vgl. Goger (2017): Thesen zur Zukunft des Baubetriebs, S. 197

Als zentrales Element des branchenspezifischen Industrie 4.0-Konzepts der Bauindustrie kann die Methode des Building Information Modeling angesehen werden. Eine weitere wesentliche Komponente stellt das Internet der Dinge und Dienste dar.³⁵³ Der Begriff BIM ist in der Fachliteratur nicht eindeutig definiert und wird in Abhängigkeit des Standpunkts und des Blickwinkels sowie der Herangehensweise der Projektbeteiligten unterschiedlich interpretiert und ausgelegt.³⁵⁴ Diese Arbeit orientiert sich an der Definition des Stufenplans Digitales Planen und Bauen des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur. BIM wird hier definiert als „eine kooperative Arbeitsmethodik, mit der auf der Grundlage digitaler Modelle eines Bauwerks die für seinen Lebenszyklus relevanten Informationen und Daten konsistent erfasst, verwaltet und in einer transparenten Kommunikation zwischen den Beteiligten ausgetauscht oder für die weitere Bearbeitung übergeben werden.“³⁵⁵ Eine Übersicht und Diskussion zu den verschiedenen weiteren Definitionsansätzen kann GÖGER³⁵⁶ entnommen werden. Trotz der Relevanz der BIM-Methode für die vorliegende Arbeit, wird auf Grund der umfangreichen Thematik an dieser Stelle für eine vertiefende Auseinandersetzung auf weiterführende Literatur³⁵⁷ verwiesen.

Neben BIM können als Entwicklungen und Auswirkungen respektive neue Technologien in der Produktion und auf der Baustelle bspw. intelligente und mit Sensoren ausgestattete Materialien und Baugeräte, der 3D-Druck oder der Einsatz von Robotern und Drohnen genannt werden. Eine Vernetzung zwischen der realen und der digitalen Welt wird u. a. durch die Nutzung von mobilen Endgeräten, das Internet der Dinge, den Einsatz von Sensoren und Laserscans oder die Anwendung von Augmented-, Virtual- sowie Mixed-Reality-Konzepten ermöglicht.^{358, 359}

BIM bietet neben der eigentlichen Gebäudemodellierung sowie der Chance eines kooperativen Planungsprozesses und einer IT-gestützten Kollisionsprüfung weitere Anwendungsmöglichkeiten im Kontext der Digitalisierung.³⁶⁰ Zur Realisierung dieser Anwendungsmöglichkeiten darf BIM nicht isoliert betrachtet und genutzt werden, sondern muss durch bspw. Cloud Computing und Big Data, in Verbindung mit der Nutzung von mobilen Endgeräten, ergänzt

³⁵³ Vgl. Oesterreich/Teuteberg (2017): Industrie 4.0 in der Wertschöpfungskette Bau – Ferne Vision oder greifbare Realität?, S. 74 f.

³⁵⁴ Vgl. Von Both et al. (2012): BIM – Potentiale, Hemmnisse und Handlungsplan, S. 9

³⁵⁵ Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2015): Stufenplan Digitales Planen und Bauen, S. 4

³⁵⁶ Vgl. Goger et al. (2018): Studie: Potenziale der Digitalisierung im Bauwesen, S. 16 ff.

³⁵⁷ Siehe hierzu bspw. Albrecht (2015): Building Information Modeling (BIM) in der Planung von Bauleistungen; Borrmann et al. (2015): Building Information Modeling; Spengler/Peter (2020): Die Methode Building Information Modeling

³⁵⁸ Vgl. Goger/Breitwieser (2019): Digitalisierung in der Bauindustrie – Status Quo, Vision, Potenziale und Voraussetzungen, S. 116

³⁵⁹ Vgl. Oesterreich/Teuteberg (2017): Industrie 4.0 in der Wertschöpfungskette Bau – Ferne Vision oder greifbare Realität?, S. 75

³⁶⁰ Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2015): Stufenplan Digitales Planen und Bauen, S. 7

und damit kombiniert werden.³⁶¹ Auf Basis der BIM-Methode kann eine verbesserte Steuerung der Materialflüsse³⁶², eine modellbasierte und teilautomatisierte Materialbestellung³⁶³ oder die Digitalisierung der Prozesskette Bestellung, Lieferung und Dokumentation³⁶⁴ realisiert werden. Darüber hinaus ermöglicht BIM eine modellbasierte Kalkulation³⁶⁵ respektive Kostenermittlung von Bauleistungen³⁶⁶ und eine digitale und modellbasierte Arbeitsweise im Kontext der Anwendung der Lean Construction³⁶⁷. Ebenso basieren die Ansätze zur Simulation von baulogistischen Prozessen^{368, 369, 370}, die simulationsgestützte Bauablaufplanung³⁷¹ oder die Visualisierung von Bauabläufen³⁷² auf 3D-Modellen. Ferner sind im Kontext des Steuer- und Regelkreises des echtzeitnahen Bauprojektcontrollings industrielle Anwendungsfälle auf Basis eines digitalen Zwillings³⁷³ publiziert.

Der Einsatz von Sensoren kann bspw. bei Baugeräten, die umfangreich mit verschiedenen Sensoren ausgestattet und daher gut analysierbar sind, konstatiert werden. Geräteleistungen und Baustellenrandbedingungen können in Echtzeit erfasst und ausgewertet werden.³⁷⁴ Des Weiteren kann hierdurch eine vorausschauende Wartung³⁷⁵ ermöglicht oder der Gerätestandort³⁷⁶ erfasst werden. Beim sonstigen Einsatz von Sensoren im Baubetrieb sowie im Kontext der Baulogistik kann eine intensive Auseinandersetzung in der Forschung mit der RFID-Technologie³⁷⁷ festgestellt werden. Es werden auf Grundlage dieser Technologie echtzeitnahe und medienbruchfreie Informations- und Kommunikationssysteme³⁷⁸, Modelle zur Unterstützung baulogistischer Prozesse³⁷⁹, Steuerungs- und Dokumentationssysteme für die

³⁶¹ Vgl. Oesterreich/Teuteberg (2017): Industrie 4.0 in der Wertschöpfungskette Bau – Ferne Vision oder greifbare Realität?, S. 75

³⁶² Vgl. Clausen/Weber (2010): Nutzung von Gebäudedaten in der Baulogistik

³⁶³ Vgl. Lange/Tyryshkina (2018): Die modellbasierte Materialbestellung in einem Generalunternehmen – Entwicklung eines teilautomatisierten Bestellprozesses für den Rohbau

³⁶⁴ Vgl. Berner et al. (2018): Prototypische Entwicklung eines BIM-Instruments für die Bestellung, Lieferung und Dokumentation von Transportbeton

³⁶⁵ Vgl. Silbe (2017): Modellbasierte Kalkulation

³⁶⁶ Vgl. Gralla/Lenz (2019): Digitalisierungspotenziale im Rahmen der Kostenermittlung von Bauleistungen

³⁶⁷ Vgl. Leifgen (2019): Ein Beitrag zur digitalen Transformation der Lean Construction am Beispiel der BIM-basierten Taktplanung und Taktsteuerung

³⁶⁸ Vgl. Weber (2007): Simulation von Logistikprozessen auf Baustellen auf Basis von 3D-CAD Daten

³⁶⁹ Vgl. Habernicht et al. (2011): Simulation der Baustellenlogistik am Beispiel eines Flugsteiges

³⁷⁰ Vgl. Voigtmann (2014): Simulation baulogistischer Prozesse im Ausbau

³⁷¹ Vgl. Borrmann et al. (2011): Simulationsgestützte Bauablaufplanung

³⁷² Vgl. Teizer et al. (2017): Automatisierte 4D-Bauablaufvisualisierung und Ist-Datenerfassung zur Planung und Steuerung von Bauprozessen

³⁷³ Vgl. Kosel (2022): Ein Beitrag zur Prozessautomatisierung im Bauprojekt-Controlling

³⁷⁴ Vgl. Goger (2017): Thesen zur Zukunft des Baubetriebs, S. 200

³⁷⁵ Vgl. Goger/Breitwieser (2019): Digitalisierung in der Bauindustrie – Status Quo, Vision, Potenziale und Voraussetzungen, S. 120

³⁷⁶ Vgl. Motzko et al. (2013): Grundlagen des Bauprozessmanagements, S. 29

³⁷⁷ Vgl. Helmus et al. (2009): RFID in der Baulogistik

³⁷⁸ Vgl. Klaubert (2011): Entwicklung eines RFID-basierten Informations- und Kommunikationssystems für die Baulogistik

³⁷⁹ Vgl. Meins-Becker (2011): Modell zur Unterstützung baulogistischer Prozesse entlang der Versorgungskette der Bauwirtschaft

Baulogistik über einen Baulogistikleitstand³⁸⁰ oder Systeme zur Echtzeitsteuerung von baulegistischen Prozessen³⁸¹ sowie zur Identifikation und Verfolgung von Betriebsmitteln³⁸² entwickelt. Des Weiteren sind EDV- und GPS-gestützte Telematiksysteme für die Transportlogistik in der Bauindustrie mit einer mobiler Datenerfassung³⁸³ sowie technologieunterstützte Anlieferungsstrategien und Softwarelösungen³⁸⁴ publiziert. Im Kontext der Schalungstechnik konnte gezeigt werden, dass das Schalungselement durch eine sensorisch erfasste Betonberührung als Informationsträger des Wertschöpfungsprozesses genutzt werden kann.³⁸⁵ Sensorlösungen sowie entsprechende Software zur Betonreifemessung und anschließender Bestimmung des Ausschaltzeitpunkts sind am Markt verfügbar.³⁸⁶ Die für das entwickelte sensorgestützte Baustellenversorgungssystem relevanten Sensoren werden in Kapitel 3.3 und Kapitel 4.2 thematisiert.

Die Einführung des 3D-Drucks und damit in Verbindung stehend der Robotereinsatz in der Bauindustrie, kann sowohl im Stahlbau als auch im Betonbau beobachtet werden. In beiden Bereichen lassen sich vielfältige Forschungsaktivitäten feststellen. Exemplarisch sei an dieser Stelle für den Bereich des Stahlbaus auf FISCHER³⁸⁷, LANGE et al.³⁸⁸, FEUCHT et al.³⁸⁹ und BRELL-COKCAN et al.³⁹⁰ sowie für den Bereich des Betonbaus auf OTTO/KRAUSE³⁹¹ und NÄTHER et al.³⁹² verwiesen. Darüber hinaus werden Produkte im Bereich der Automatisierung respektive des Robotereinsatzes wie bspw. ein Bohrroboter für das Überkopfbohren³⁹³, am Markt angeboten.

Eine weitere Auswirkung der Digitalisierung ist die Nutzung der Augmented-, Virtual- und Mixed-Reality. Virtual-Reality-Brillen ermöglichen dem Kunden bspw. einen virtuellen Einblick des zukünftigen Gebäudes in frühen Projektphasen und dadurch eine erleichterte sowie

³⁸⁰ Vgl. Helmus et. al (2011): RFID-Baulogistikleitstand

³⁸¹ Vgl. Binder (2014): Ereignisbasierte Steuerung baulegistischer Prozesse mit Echtzeit-Ortungssystemen

³⁸² Vgl. Günthner/Schneider (2009): RFID-Einsatz in der Baubranche: Entwicklung eines RFID-Systems mit mobilen Gates auf Baustellen zur schnellen Identifikation und Verfolgung von Betriebsmitteln zwischen Baustellen und Werken

³⁸³ Vgl. Sanladerer (2008): EDV-gestützte Disposition mit Telematikeinsatz und mobiler Datenerfassung in der Baulogistik

³⁸⁴ Vgl. Hölczli (2014): Technologieunterstützte Anlieferstrategien bei Baumaßnahmen im Bestand – TABB. Schlussbericht, AIF/IGF-Vorhaben 17167

³⁸⁵ Vgl. Nolte (2012): Ein Beitrag zur effizienten Steuerung des Einsatzes von Schalungsmietgeräten auf Baustellen

³⁸⁶ Vgl. Pruckmayr (2019): Bauprozess optimieren, S. 842

³⁸⁷ Fischer (2014): Eine Untersuchung zur roboterbasierten Baugruppenfertigung im Stahlbau

³⁸⁸ Lange et al. (2020): 3-D gedruckte Fußgängerbrücke aus Stahl

³⁸⁹ Feucht et al (2020): Additive manufacturing by means of parametric robot programming

³⁹⁰ Brell-Cokcan et al. (2017): Potenziale und Herausforderungen für den Einsatz von Robotik im Bauwesen – Automatisierung und Robotik im Stahlbau

³⁹¹ Otto/Krause (2017): CONPrint3D®: 3D-Druck als Innovation im Betonbau

³⁹² Näther et al. (2017): Beton-3D-Druck – Machbarkeitsuntersuchungen zu kontinuierlichen und schalungsfreien Bauverfahren durch 3D-Formung von Frischbeton

³⁹³ Vgl. Krönert/Zanona (2021): Automatisierte Bauprozesse durch Robotik

frühzeitige Entscheidungsfindung.³⁹⁴ Augmented-Reality-Brillen können u. a. bei Wartungsarbeiten an Anlageteilen zur visuellen Unterstützung zum Einsatz kommen.³⁹⁵ Darüber hinaus kommt die Augmented-Reality bei Weiterbildungen und Schulungen bspw. im Kontext des Arbeits- und Gesundheitsschutzes zum Einsatz.³⁹⁶

Die Entwicklung von Drohnen sowie die Verbesserung des Laserscans ermöglichen die vollständige Vermessung und Digitalisierung der gebauten Realität und damit verbunden bspw. die Dokumentation sowie die Mängel- und Bestandserhebung. Des Weiteren ist es denkbar, dass zukünftig durch geometrische Soll-Ist-Vergleiche Aussagen zur Leistungserbringung in Echtzeit getroffen und daraus resultierende Abrechnungsunterlagen automatisch erstellt werden können.^{397, 398} In diesem Kontext sei auch auf die Forschungsaktivitäten auf den Gebieten des maschinellen Sehens³⁹⁹, der Informationsgewinnung aus Bildern⁴⁰⁰ sowie der Nutzung der Photogrammetrie⁴⁰¹ im Bauwesen hingewiesen. Damit in Verbindung stehende wissenschaftliche Untersuchungen, Ansätze und Lösungen lieferten bereits PFLUG⁴⁰² und MEHR⁴⁰³.

Neben den dargestellten, überwiegend baustellenbezogenen Auswirkungen der Digitalisierung können ebenso bei den stationären Produktionsunternehmen der Bauindustrie, wie bspw. einem Fertigteilwerk, Veränderungen durch die Digitalisierung festgestellt werden.⁴⁰⁴ Diese Veränderungen, wie u. a. die Einführung von Enterprise Resource Planning Systemen sind bereits im Kontext der Auswirkungen der Digitalisierung auf die Logistik dargestellt und können für die Bauindustrie hieraus abgeleitet werden.

Die thematisierten Möglichkeiten der Digitalisierung gehen einher mit einer enormen Datenmenge und dem damit verbundenen Schlagwort Big Data. Diese enormen Datenmengen können als unstrukturiertes und ungefiltertes Verfügungswissen bezeichnet werden. Dieses Verfügungswissen muss gefiltert, verknüpft und kontextualisiert werden, um in Orientierungswissen transformiert und schließlich nutzenstiftend angewendet werden zu können.⁴⁰⁵ Hierzu müssen die vorhandenen Daten systematisiert und abgegrenzt werden sowie den je-

³⁹⁴ Vgl. Goger/Bisenberger (2019): Der Baumeister in 50 Jahren, S. 27

³⁹⁵ Vgl. Gralla/Lenz (2017): Digitalisierung im Baubetrieb – Building Information Management und virtuelle Zwillinge, S. 206

³⁹⁶ Vgl. Dzięgielewski (2018): Handbuch zur AR-basierten Anwendung von Schalungen und Gerüsten

³⁹⁷ Vgl. Goger/Breitwieser (2019): Digitalisierung in der Bauindustrie – Status Quo, Vision, Potenziale und Voraussetzungen, S. 116

³⁹⁸ Vgl. Goger (2017): Thesen zur Zukunft des Baubetriebs, S. 201

³⁹⁹ Vgl. Jahr/Braun (2018): Maschinelles Sehen für die automatische Erkennung von Baubehelfen

⁴⁰⁰ Vgl. Jahr (2019): Über Baustellen Lernen – Wissensgewinn aus Luftbildern

⁴⁰¹ Vgl. Hofstadler et al. (2019): Digitalisierung im Baubetrieb – Einsatz der Photogrammetrie zur 3D-Rekonstruktion

⁴⁰² Pflug (2008): Ein Bildinformationssystem zur Unterstützung der Bauprozesssteuerung

⁴⁰³ Mehr (2012): Polysensorale Bauprozessidentifikation durch kognitive Systeme

⁴⁰⁴ Vgl. Pflug (2017): Einsatz von IT-Systemen in der industriellen Praxis

⁴⁰⁵ Vgl. Hofstadler (2021): Multisystemische Hybridpyramide für den agilen Baubetrieb, S. 8

weiligen Prozessen und Bauteilen richtig zugeordnet werden, damit die Bauwerke und Bauprozesse intelligenter werden. Aus den vielfältigen Daten sind relevante Informationen zu generieren, die einem projektspezifischen und organisationalen digitalen Wissensspeicher zugeführt werden müssen. Diese Wissensspeicher bieten neue Möglichkeiten des Daten- und Informationsaustauschs und besitzen vor allem für zukünftige Projekte eine hohe Relevanz.⁴⁰⁶ Wissen stellt in diesem Zusammenhang einen grundlegenden Produktionsfaktor dar und ist verantwortlich für die effiziente Kombination und das Zusammenwirken aller weiteren dispositiven und elementaren Produktionsfaktoren. Um den notwendigen Wissensaustausch zwischen den Produktionsfaktoren zu ordnen, zu archivieren und zu speichern, sollten Systeme des Wissensmanagements installiert und genutzt werden.⁴⁰⁷ Exemplarisch sei an dieser Stelle auf das entwickelte Wissensmanagement in der Sichtbetontechnologie von LINNEBACHER⁴⁰⁸ verwiesen.

Die in diesem Kapitel exemplarisch dargestellten Auswirkungen und Möglichkeiten der Digitalisierung basieren teilweise auf Forschungsaktivitäten und -projekten oder stellen prototypische Ansätze dar, die in der baubetrieblichen Praxis noch nicht vollumfänglich zur Anwendung kommen. Als Gründe hierfür können sowohl branchenspezifische als auch allgemeine Ursachen angeführt werden. Neben den branchenspezifischen Aspekten wie bspw. die Komplexität der Bauproduktion, die fragmentierte Wertschöpfungskette oder die ortsgebundenen, externen Einflüsse sind als allgemeine Aspekte ökonomische, soziale, technische und rechtliche Hemmnisse zu konstatieren.⁴⁰⁹

Im Kontext der vorliegenden Arbeit kann als ein wesentliches zu realisierendes Potenzial der Digitalisierung die digitale Vernetzung einzelner Akteure der Bauwirtschaft untereinander sowie mit den Lieferanten und den damit einhergehenden Lieferantenbeziehungen genannt werden.⁴¹⁰ Des Weiteren formuliert der Technische Ausschuss des Hauptverbandes der Deutschen Bauindustrie 10 Thesen zu verschiedenen digitalen Entwicklungstrends. Eine dieser Thesen beschreibt die Verknüpfung von BIM-Modellen mit dem Bestellprozess und in diesem Zusammenhang die Nachfrage und Notwendigkeit von projektspezifischen vorkonfektionierten Lieferungen in Verbindung mit Zwischendistributionen über zentrale Lagerzentren.⁴¹¹ Die vorliegende Arbeit leistet für die Realisierung der genannten Potenziale sowie zur Erfüllung der vorhandenen Nachfrage einen Beitrag.

⁴⁰⁶ Vgl. Hofstadler (2019): Aktuelle Entwicklungen in Baubetrieb, Bauwirtschaft und Bauvertragsrecht, S. V f.

⁴⁰⁷ Vgl. Hofstadler/Ninaus (2019): Wissen als grundlegender Produktionsfaktor in der Bauwirtschaft, S. 888

⁴⁰⁸ Linnebacher (2019): Wissensmanagement in der Sichtbetontechnologie

⁴⁰⁹ Vgl. Oesterreich/Teuteberg (2017): Industrie 4.0 in der Wertschöpfungskette Bau – Ferne Vision oder greifbare Realität?, S. 85

⁴¹⁰ Vgl. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (2019): Beitrag der Digitalisierung zur Produktivität in der Baubranche, S. 54 f.

⁴¹¹ Vgl. Bauindustrie//aktuell (2018): Trends der Digitalisierung in der Bauindustrie, S. 5 f.

3 Basiselemente der Systembildung

Das folgende Kapitel beinhaltet die Beschreibung der Basiselemente der Systembildung. Diese sind das Supply-Chain-Management, das Konzept Warenverteilzentrum und der Einsatz von Sensorik. Die Ausführungen zu diesen Themenfeldern dienen als Grundlage sowie zur Einordnung des im weiteren Verlauf dieser Arbeit entwickelten Baustellenversorgungssystems.

3.1 Supply-Chain-Management

Das Unterkapitel zum Supply-Chain-Management erörtert zunächst Definitionen, mögliche Abgrenzungen zu verwandten Begriffen sowie weitere für die Ziele der Arbeit relevante Aspekte zum Supply-Chain-Management in der Logistikbranche. Darauf aufbauend erfolgt eine Betrachtung des Supply-Chain-Managements in der Bauindustrie und in diesem Kontext eine Darstellung zum gegenwärtigen Stand einer branchespezifischen Übertragung sowie damit verbundener Modelle des Supply-Chain-Managements in der Bauindustrie.

3.1.1 Supply-Chain-Management in der Logistikbranche

Für das Verständnis und die Nachvollziehbarkeit der definitorischen Vielfalt des Begriffs des Supply-Chain-Managements ist eine Beschäftigung mit dem Begriff der Supply-Chain notwendig. Neben der definitorischen Vielfalt des Begriffs des Supply-Chain-Managements ist bereits erkennbar, dass auch der Begriff der Supply-Chain in der Fachliteratur nicht eindeutig definiert sowie verwendet und übersetzt wird. Als Supply-Chain wird zum einen die Beschaffungskette bezeichnet, die die gesamte Versorgungskette von der Rohstoffgewinnung bis hin zum Endkunden hinsichtlich aller Material- und Informationsflüsse, die zur Produktion und Distribution von Produkten erforderlich sind darstellt.⁴¹² Zum anderen wird als Supply-Chain die Wertschöpfungskette eines Produkts verstanden. Die Wertschöpfungskette stellt dabei sämtliche Fertigungs- und Absatzstufen dar, die das Produkt von der Rohstoffgewinnung über die Produktion bis hin zum Absatzmarkt beim Endkunden durchläuft und anhand derer der Wert eines Produkts sukzessive gesteigert wird.⁴¹³ Des Weiteren ist der Begriff der Supply-Chain eng mit dem Begriff der Logistikkette verbunden. Im Gegensatz zur Logistikkette, bei der die Beziehungen und Prozesse zwischen dem direkten Lieferanten und dem direkten Kunden betrachtet werden, finden bei der Supply-Chain auch die vorgelagerten Lieferanten sowie alle nachfolgenden Handels- und Kundenstufen Berücksichtigung.⁴¹⁴ Darüber hinaus betrachtet die Supply-Chain im Gegensatz zur Logistikkette nicht nur die logistischen Prozesse des Transports, des Umschlags und der Lagerung, sondern ebenso die Produktionsprozesse sowie die begleitenden Auftragsabwicklungs- und Geldflussprozesse.⁴¹⁵ Die Logistikkette, als Verbindung einer Lieferstelle mit einer Empfangsstelle im Allgemeinen, kann in Abhängigkeit der Aufgabe und weiterer Aspekte im Speziellen bspw. auch als Liefer-, Transport-, Beförderungs- oder Entsorgungskette bezeichnet werden.⁴¹⁶

⁴¹² Vgl. Bichler et al. (2017): Kompakt-Lexikon Logistik, S. 25

⁴¹³ Vgl. Klaus (2012): Supply Chain Management, S. 549

⁴¹⁴ Vgl. Schulte (2009): Logistik, S. 13 f.

⁴¹⁵ Vgl. Klaus (2012): Supply Chain Management, S. 555

⁴¹⁶ Vgl. Gudehus (2010): Logistik, S. 889

Bevor die für die vorliegende Arbeit zu Grunde liegende Definition zum Supply-Chain-Management erläutert wird, ist anzumerken, dass die o. g. Abgrenzung zwischen Supply-Chain und Logistikkette und dem folgend die Abgrenzung zwischen Supply-Chain-Management und Logistik kontrovers diskutiert wird. Dies belegt u. a. eine Untersuchung von LARSON/HALLDORSSON⁴¹⁷. In Abbildung 19 sind die zu diskutierenden unterschiedlichen Möglichkeiten der Abgrenzung dargestellt.

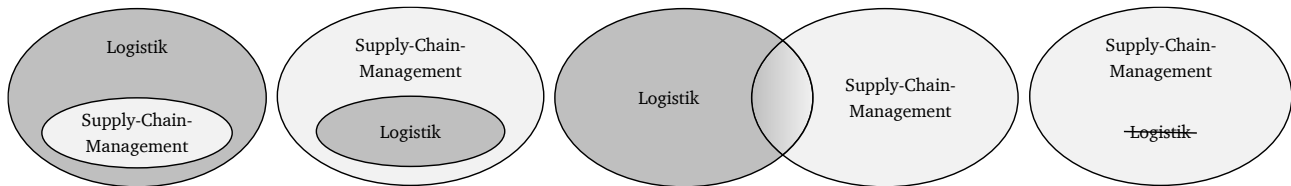


Abbildung 19: Sichtweisen zur Abgrenzung zwischen Supply-Chain-Management und Logistik⁴¹⁸

Die traditionelle Sichtweise versteht Logistik als weiter gefasstes Konzept im Vergleich zum Supply-Chain-Management, das sich lediglich auf unternehmensexterne Aspekte konzentriert. Dem gegenüber steht die Einordnung der Logistik als Teildisziplin des Supply-Chain-Managements. Der Logistik werden hierbei die Prozesse Transport, Umschlag und Lagerung zugeordnet. Des Weiteren wird auch die Auffassung vertreten, dass sich beide Begriffe überschneiden. Dem Supply-Chain-Management wird bei dieser Auffassung vor allem eine strategische sowie wenig taktische Ausrichtung und der Logistik dementsprechend eine vor allem taktische und wenig strategische Ausrichtung, zugeordnet. Die vierte Sichtweise versteht Logistik und Supply-Chain-Management als synonyme Begriffe. Die Umbenennung der historisch gewachsenen Logistik wird mit dem Erfordernis weltweiter Warenflüsse begründet und damit einhergehend der vollständigen Ablösung durch das Supply-Chain-Management, das als strukturgleiche Philosophie in einem anderen, erweiterten Kontext im Vergleich zur Logistik verstanden werden kann.^{419, 420} Im weiteren Verlauf soll nicht näher auf die in der Fachliteratur⁴²¹ geführte intensive und kritische Diskussion und dem weiterhin ungelösten Abgrenzungsproblem zwischen der Logistik respektive dem Logistikmanagement und dem Supply-Chain-Management eingegangen werden. Da sich eine Integration der Logistik in das Supply-Chain-Management und damit verbunden eine Berücksichtigung der unternehmens-

⁴¹⁷ Larson/Halldorsson (2004): Logistics Versus Supply Chain Management: An International Survey

⁴¹⁸ In Anlehnung an Larson/Halldorsson (2004): Logistics Versus Supply Chain Management: An International Survey, S. 19

⁴¹⁹ Vgl. Larson/Halldorsson (2004): Logistics Versus Supply Chain Management: An International Survey, S. 18 ff.

⁴²⁰ Vgl. Hausladen (2014): IT-gestützte Logistik, S. 19 f.

⁴²¹ Vgl. hierzu bspw. Bretzke (2020): Logistische Netzwerke, S. 79 ff.; Large (2016): Logistikmanagement, S. 52 ff.; Schulte (2009): Logistik, S. 13 ff.

übergreifenden Aspekte, vor dem Hintergrund der vorliegenden Arbeit, als zielführend erweist, liegt der Arbeit folgende Definition⁴²² zum Supply-Chain-Management nach KUHN/HELLINGRATH zu Grunde:

„Supply Chain Management ist die integrierte prozessorientierte Planung und Steuerung der Waren-, Informations- und Geldflüsse entlang der gesamten Wertschöpfungskette vom Kunden bis zum Rohstofflieferanten mit den Zielen: Verbesserung der Kundenorientierung, Synchronisation der Versorgung mit dem Bedarf, Flexibilisierung und bedarfsgerechte Produktion, Abbau der Bestände entlang der Wertschöpfungskette.“⁴²³

Das in der prozess- und flussorientierten Definition des unternehmensübergreifenden Supply-Chain-Managements vermittelte Bild einer Kette sollte auf Grund der Anzahl und der Verbindungen der Beteiligten besser als Netzwerk im Sinne eines Supply-Net-Managements bezeichnet werden. Der Begriff des Supply-Chain-Managements hat sich aber im internationalen Sprachgebrauch etabliert und wird deshalb in der vorliegenden Arbeit verwendet.^{424, 425}

Neben dem unternehmensübergreifenden Supply-Chain-Management können Abbildung 20 die weiteren Ansätze des Supply-Chain-Managements entnommen werden.

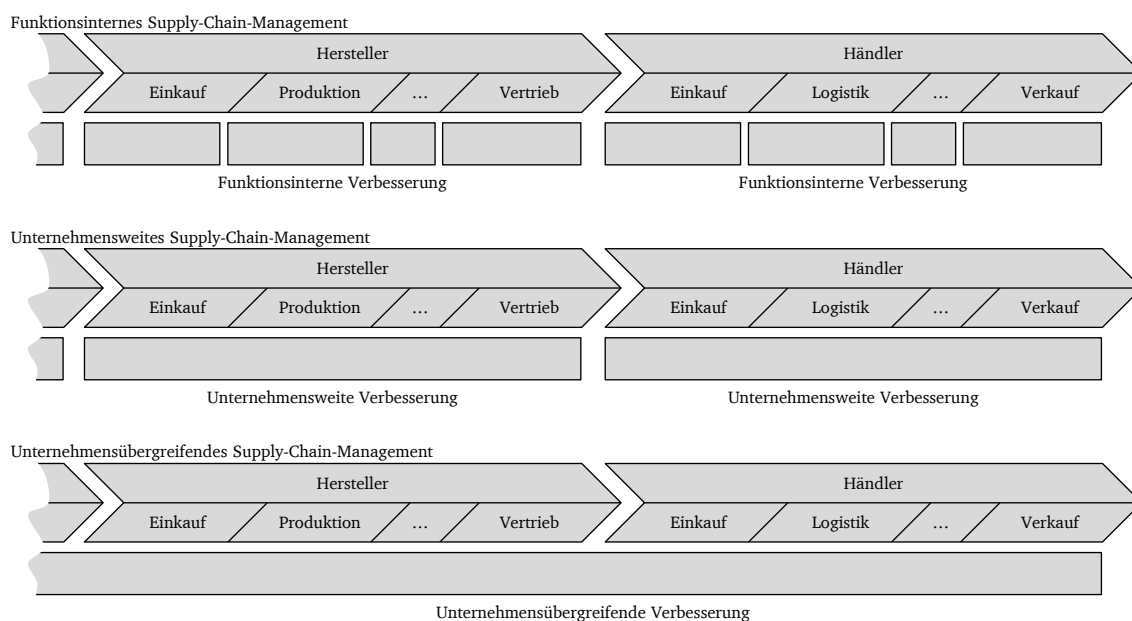


Abbildung 20: Ansätze des Supply-Chain-Managements⁴²⁶

⁴²² Eine Übersicht und Diskussion zu der Vielzahl an Definitionen zum Supply-Chain-Management kann bspw. Freiwald (2005): Supply Chain Design, S. 8 ff.; Göpfert (2013): Logistik, S. 26; Heiserich et al. (2011): Logistik, S. 30 f.; Muchna et al. (2018): Grundlagen der Logistik, S. 20 ff. entnommen werden.

⁴²³ Kuhn/Hellingrath (2002): Supply Chain Management, S. 10

⁴²⁴ Vgl. Pfohl (2016): Logistikmanagement, S. 24

⁴²⁵ Vgl. Schuh et al. (2013): Einführung in das Logistikmanagement, S. 14

⁴²⁶ In Anlehnung an Papier/Thonemann (2018): Supply Chain Management, S. 30

Das funktionsinterne Supply-Chain-Management beschreibt Ansätze innerhalb einzelner Funktionen wie bspw. dem Einkauf, der Produktion oder dem Vertrieb im Unternehmen. Das unternehmensweite Supply-Chain-Management fokussiert die Koordination innerhalb eines Unternehmens über mehrerer Funktionen hinweg mit dem Ziel, Ineffizienzen durch Zielkonflikte zwischen Bereichen zu eliminieren und die Leistungserstellung hinsichtlich des Ergebnisses des gesamten Unternehmens zu verbessern.⁴²⁷

Innerhalb des Supply-Chain-Managements wird ein Order-to-Payment-S durchlaufen. Abbildung 21 zeigt das innerbetriebliche Order-to-Payment-S. Durch die Aneinanderreihung dieser einzelnen innerbetrieblichen Order-to-Payment-S ergibt sich das in Abbildung 22 dargestellte unternehmensübergreifende Supply-Chain-Management.

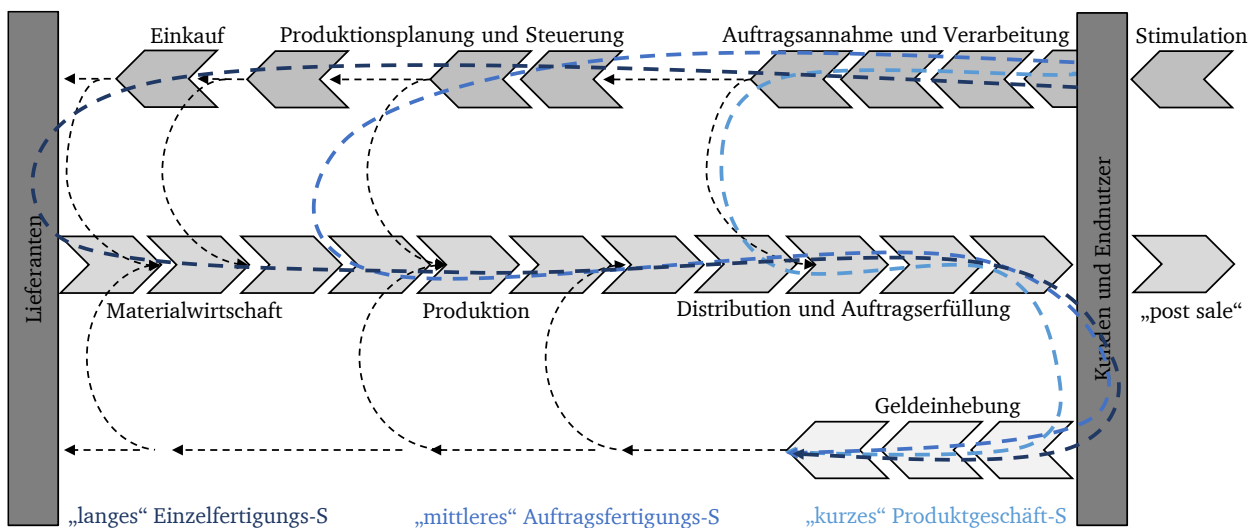


Abbildung 21: Innerbetriebliches Order-to-Payment-S⁴²⁸

Die obere Prozesskette beschreibt den Auftragsabwicklungsprozess, der durch den Kunden stimuliert wird und durch Informationsflüsse geprägt ist. Die mittlere Prozesskette stellt den an den Auftragsabwicklungsprozess gegenläufig gekoppelten Materialfluss- respektive Produktionsprozess dar, symbolisiert die materiellen Aktivitäten und dient der Erfüllung des Kundenauftrags. Die untere Prozesskette visualisiert den Finanzflussprozess gegenüber dem Kunden und dem Lieferanten. Der Umfang der Prozesskette und damit die Länge des Payment-to-Order-S ist branchen- und produktabhängig. Bei vorratsorientierten Produktionsprozessen, wie bspw. in der Konsumgüterwirtschaft oder der standardisierten industriellen Massenproduktion ergibt sich ein kurzes Payment-to-Order-S und dementsprechend eine kurze Lieferzeit für den Kunden. Bei einer bestandlosen Auftragsfertigung, wie bspw. in der Automobil-, Möbel- und weiten Teilen der Maschinenbauindustrie verlängert sich das Payment-

⁴²⁷ Vgl. Papier/Thonemann (2018): Supply Chain Management, S. 30 f.

⁴²⁸ In Anlehnung an Klaus (2012): Supply Chain Management, S. 557 f.

to-Order-S. Im Vergleich zum Produktgeschäft werden auch Produktionsplanungs- und Materialbereitstellungsprozesse durchlaufen. Bei der Einzel- und Sonderfertigung, wie bspw. im Anlagenbau, verlängert sich das Payment-to-Order-S bis hinein in die Produktionsplanungs- und Konstruktionsprozesse der Vorlieferanten. Es entsteht die in Abbildung 22 dargestellte Aneinanderreihung einzelner innerbetrieblicher Order-to-Payment-S, im abgebildeten Fall die Aneinanderreihung vom endgültigen Kunden bis zum Rohstoff.⁴²⁹

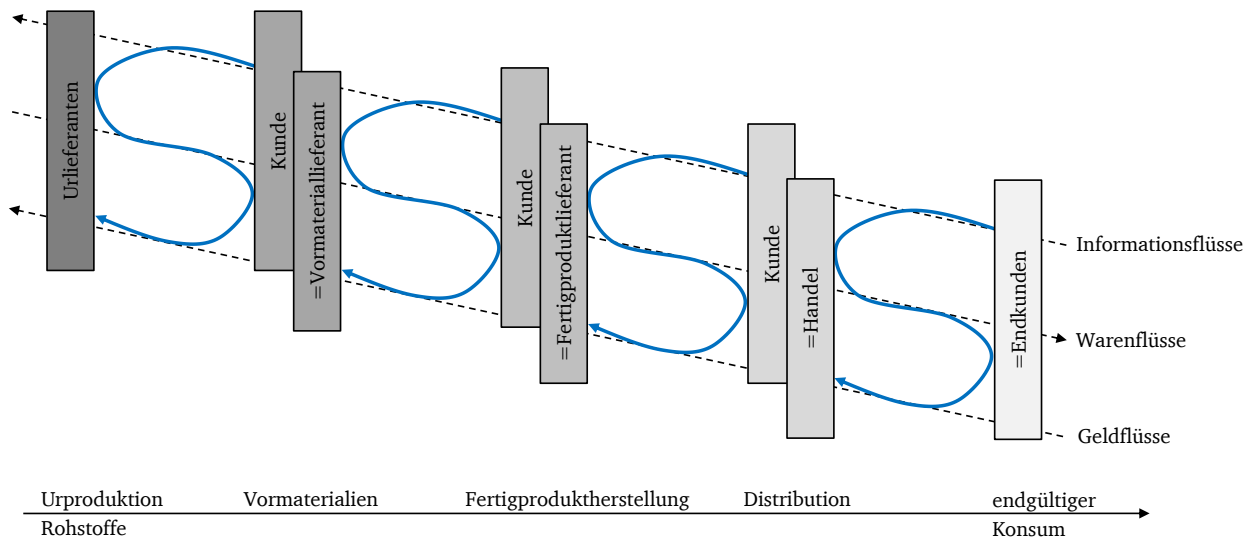


Abbildung 22: Aneinanderreihung einzelner innerbetrieblicher Order-to-Payment-S⁴³⁰

Die unternehmensübergreifenden Prozesse und die sich ergebenden Abhängigkeiten führen zu immer höheren Anforderungen an die Koordination und Kooperation zwischen den einzelnen Akteuren. Dieser Herausforderung kann mit einer neuen Generation von Informationssystemen begegnet werden. Neben der kooperativen Partnerschaft der einzelnen Akteure sowie der Einführung von Informations- und Kommunikationssystemen ist ein weiteres Grundprinzip für die erfolgreiche Realisierung eines Supply-Chain-Managements eine gemeinsame Prozessanalyse und Geschäftsprozessgestaltung.⁴³¹ Zur Umsetzung dieser Grundprinzipien ist in der Fachliteratur eine Vielzahl an Supply-Chain-Management-Konzepten publiziert.⁴³² Beispielhaft sei hier auf Grund ihres häufigen Einsatzes in der Praxis das Konzept des Collaborative Planning, Forecasting and Replenishments (CPFR)⁴³³ zur partnerschaftliche Planung, Prognose und Warenversorgung und das Konzept Efficient-Consumer-Response

⁴²⁹ Vgl. Klaus (2012): Supply Chain Management, S. 556 ff.

⁴³⁰ In Anlehnung an Klaus (2012): Supply Chain Management, S. 557

⁴³¹ Vgl. Hegmanns et al. (2008): Prozesse in Logistiknetzwerken – Supply Chain Management, S. 459 f.

⁴³² Vgl. Schuh et al. (2013): Konzepte des Supply-Chain-Managements, S. 213

⁴³³ Vgl. hierzu bspw. Hausladen (2014): IT-gestützte Logistik, S. 174 ff.; Hegmanns et al. (2008): Prozesse in Logistiknetzwerken – Supply Chain Management, S. 477 ff.; Schuh et al. (2013): Konzepte des Supply-Chain-Managements, S. 214 f.

(ECR)⁴³⁴ zur gemeinsamen effizienten Gestaltung des Waren- und Informationsflusses genannt. Zur einheitlichen Beschreibung, Bewertung und Analyse von Geschäftsbeziehungen und Wertschöpfungsnetzwerken wurde das Supply Chain Operations Reference Model (SCOR)⁴³⁵ als standardisiertes Prozess-Referenzmodell der Supply-Chain entwickelt. Auf den Einsatz von Warenverteilzentren innerhalb des Supply-Chain-Managements und deren Funktionen sowie Auswirkungen auf das Supply-Chain-Management wird in Kapitel 3.2.1 eingegangen.

⁴³⁴ Vgl. hierzu bspw. Hausladen (2014): IT-gestützte Logistik, S. 169 ff.; Prockl (2012): Efficient Consumer Response, S. 141 ff.; Werner (2017): Supply Chain Management, S. 141 ff.

⁴³⁵ Vgl. hierzu bspw. Becker (2018): Prozesse in Produktion und Supply Chain optimieren, S. 163 ff.; Heiserich et al. (2011): Logistik, S. 17 ff.; Werner (2017): Supply Chain Management, S. 70 ff.

3.1.2 Supply-Chain-Management in der Bauindustrie

Durch ein Supply-Chain-Management in der Bauindustrie lassen sich Effizienzsteigerungen im Baubetrieb erreichen. Diese lassen sich nach VRIJHOEF/KOSKELA⁴³⁶ auf die im Supply-Chain-Management umgesetzten Grundsätze wie bspw. der Informationstransparenz, der Synchronisierung der Materialflüsse oder der Stabilität der Bauproduktionsprozesse zurückführen. Zur Realisierung der Effizienzsteigerung sind sämtliche Versorgungsketten sowie die daran Beteiligten zu identifizieren und hinsichtlich vorhandener Ineffizienzen zu untersuchen. Abschließend sind die festgestellten Ineffizienzen zu eliminieren.⁴³⁷ Für Baustoffe bspw. erstrecken sich die Versorgungsketten respektive Material- und Informationsflüsse vom Rohstoff- und Baustoffstoffproduzent über den Baustoffhandel und die Baustelle bis hin zum Entsorgungsunternehmen. In der Regel existieren, wie in Abbildung 23 dargestellt, mehrere parallele Versorgungsketten, die sich im Bereich der Baustelle treffen und überlagern.⁴³⁸ Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass die getätigten und noch folgenden Ausführungen im Kontext der Versorgungskette von Baustoffen ebenso bei den anderen bauleistungsgegenständen mit objektabhängigen individuellen Anpassungen Gültigkeit besitzen und zu berücksichtigen sind.

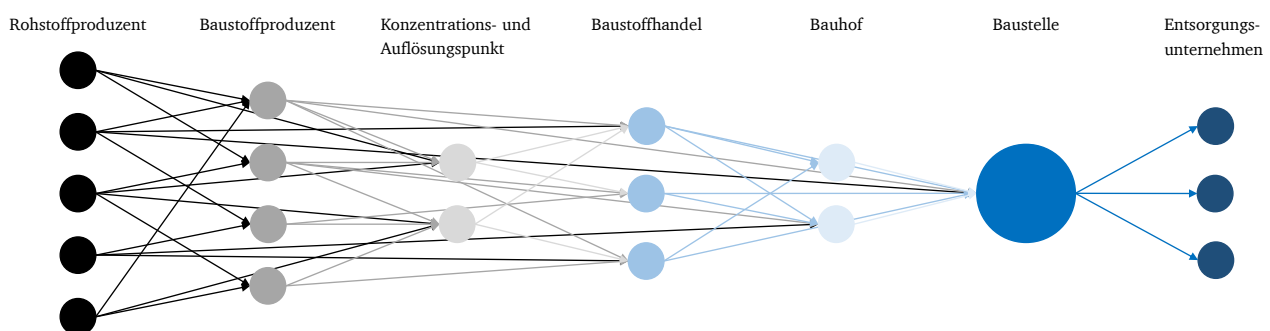


Abbildung 23: Exemplarisches Logistiknetzwerk einer Baustelle⁴³⁹

Die einzelne Versorgungskette kann hierbei durch ein, aus Quellen und Senken bestehendes, einstufiges, mehrstufiges oder kombiniertes Logistiksystem realisiert werden. Bei mehrstufigen Logistiksystemen kommen Konzentrations- und Auflösungspunkte zum Einsatz, bei denen Güter durch zusätzliche Logistikprozesse konzentriert und gebündelt oder aufgelöst werden. Die Logistiksysteme der einzelnen Versorgungsketten sind adäquat zu organisieren und zu koordinieren. Zu unterscheiden sind raum-zeitlich statische und raum-zeitlich dynamische Versorgungsketten. Die raum-zeitlich statische Versorgungskette beschreibt überbetriebliche materielle Güterflüsse von bspw. Baustoffen oder Baugeräten, die unabhängig von einem

⁴³⁶ Vrijhoef/Koskela (2000): The four roles of supply chain management in construction

⁴³⁷ Vgl. Girmscheid (2015): Angebots- und Ausführungsmanagement – prozessorientiert, S. 244

⁴³⁸ Vgl. Voigtmann/Bärgstädt (2010): Simulationsgestütztes Supply Network Management auf Baustellen, S. 167 f.

⁴³⁹ Eigene Darstellung

spezifischen Bauprojekt bestehen. Diese Versorgungskette wird charakterisiert durch eine räumlich fixierte Quellen-Senken-Struktur, eine langfristige Kunden-Lieferanten-Beziehung, eine sequenzielle Abfolge der einzelnen Wertschöpfungsstufen sowie einer überwiegenden Steuerung der Güterflüsse nach dem Push-Prinzip. Raum-zeitlich dynamische Versorgungsketten entstehen auf Grundlage eines konkreten Bauprojekts und sind von diesem abhängig. Diese Versorgungsketten sind gekennzeichnet durch die Berücksichtigung der standortungebundenen Quellen-Senken-Struktur auf Grund der wechselnden Produktionsstandorte, eine kurzfristige, auf die Projektlaufzeit begrenzte Zusammenarbeit der Beteiligten sowie eine Steuerung der Güterflüsse nach dem Pull-Prinzip. Eine Abgrenzung zwischen raum-zeitlich statischer und dynamischer Versorgungskette ist hierbei nicht immer trennscharf möglich. Der Baustoffhändler ist bspw. durch die Versorgung der Baustelle Teil der raum-zeitlich dynamischen Versorgungskette als auch durch seine Kunden-Lieferanten-Beziehung zur Baustoffindustrie Teil der raum-zeitlich statischen Versorgungskette.⁴⁴⁰ Die raum-zeitlich statische unternehmensübergreifende Supply-Chain gewährleistet hierbei, abgekoppelt vom individuellen Bauprojekt, die Bereitstellung der benötigten Baumaterialien für die Bauproduktion. Die raum-zeitlich dynamische unternehmensübergreifende Supply-Chain verantwortet die auftragsspezifische Planung, Disposition, Anlieferung, Verarbeitung und Bezahlung der Baustoffe für ein individuelles Bauprojekt.⁴⁴¹

Durch die ganzheitliche und gleichzeitige Betrachtung der einzelnen, voneinander unabhängigen und parallel existierenden Versorgungsketten und deren Logistiksysteme, entsteht ein komplexes Logistiknetzwerk „Baustelle“.⁴⁴² Bei den diesem Logistiknetzwerk zu Grunde liegenden Wertschöpfungsketten sowie dem Logistiknetzwerk selbst sind, wie in Abbildung 24 gezeigt, verschiedene Medien-, Informations- und Koordinationsbrüche festzustellen.

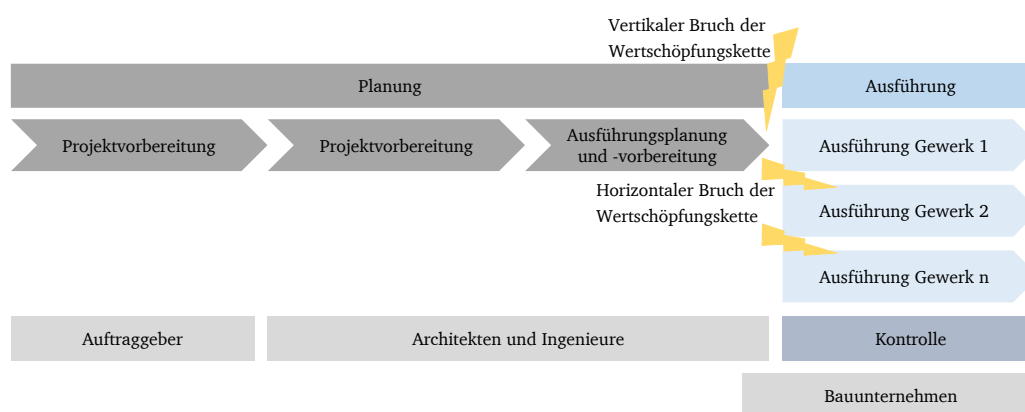


Abbildung 24: Vertikaler und horizontaler Bruch der Wertschöpfungskette einer Baustelle⁴⁴³

⁴⁴⁰ Vgl. Schmidt (2003): Wettbewerbsfaktor Baulogistik, S. 141 f.

⁴⁴¹ Vgl. Schmidt (2003): Wettbewerbsfaktor Baulogistik, S. 185

⁴⁴² Vgl. Voigtmann/Bärgstädt (2010): Simulationsgestütztes Supply Network Management auf Baustellen, S. 172 f.

⁴⁴³ In Anlehnung an Höppner/Uhl (2011): Status-quo der baulogistischen Planung und die Auswirkungen für die Materialversorgung, S. 216

Zum einen bewirkt eine getrennte Vergabe der Planungs- und Ausführungsleistungen eine relativ späte Einbindung der Bauunternehmen in die Bauproduktionsprozesse und damit einhergehend einen vertikalen Bruch zwischen vorgelagerten und nachgelagerten Wertschöpfungsstufen. Eine durchgängige Kommunikation zwischen Planungs- und Ausführungsbeteiligten von Beginn an wird erschwert. Zum anderen kann es durch eine gewerkeweise Einzelvergabe der Bauleistungen während der Ausführungsphase zu einem horizontalen Bruch zwischen Wertschöpfungsstufen derselben Ebene kommen. Dies hat zur Konsequenz, dass jedes Gewerk seine individuellen Interessen verfolgt, anstatt durch kooperatives Handeln das Gesamtsystem zu verbessern.⁴⁴⁴ Darüber hinaus können sich zwischen den Beteiligten einzelner Versorgungsketten weitere Medien-, Informations- und Koordinationsbrüche ergeben. Das Supply-Chain-Management kann dazu beigetragen, die genannten Brüche innerhalb der Wertschöpfungskette zu reduzieren respektive bestenfalls zu eliminieren.

SCHMIDT empfiehlt auf Grund der wenig repetitiven und auftragsspezifischen Versorgungsketten in Bauprojekten von Projekt-Supply-Chains und dem folgend vom Projekt-Supply-Chain-Management zu sprechen.⁴⁴⁵ Das Order-to-Payment-S des Supply-Chain-Managements wird durch das Modell der Projekt-Supply-Chain auf Bauprojekte übertragen. Die Grundlage der Projekt-Supply-Chain ist der gesamte Auftragsabwicklungsprozess eines Bauprojekts. Im Fokus steht dabei nicht der Auftragsabwicklungsprozess eines einzelnen Projektbeteiligten innerhalb einer einzelnen Projektphase oder die sequenzielle Kette von überbetrieblichen Auftragsabwicklungsprozessen. Die Basis der Projekt-Supply-Chain ist vielmehr das gesamte, an einem Bauprojekt beteiligte institutionelle Netzwerk. Jeder Beteiligte innerhalb des institutionellen Netzwerks ist in einen überbetrieblichen Auftragsabwicklungsprozess eingebunden und erbringt durch seine Leistung einen Teil zur erfolgreichen Auftragsabwicklung. Innerhalb der Projekt-Supply-Chain lassen sich die fünf zentralen Versorgungsketten der Baukonstruktion, der Bauausführung, der Baugeräte, der Baustoffe sowie der Bauentsorgung identifizieren. Jede dieser Supply-Chains beinhaltet die projektspezifische und unternehmensübergreifende Versorgungskette zwischen den entsprechenden Projektbeteiligten mit den entsprechenden Elementen. Für die im Fokus dieser Arbeit stehende Supply-Chain der Baustoffe ist dies bspw. die Versorgungskette zwischen Baustoffindustrie, Transportdienstleistern, Baustoffhandel und Baustoffverarbeitern.⁴⁴⁶ Die fünf zentralen Versorgungsketten können, wie in Abbildung 25 dargestellt, in die Prozessphasen der Planung, der Arbeitsvorbereitung, der Objektrealisierung sowie von der erfolgreichen Objektabnahme abhängigen Bezahlung, unterteilt werden. Diese Prozessphasen respektive einzelnen Wertschöpfungsketten sind sowohl sequenziell, im Sinne einer Integration der einzelnen Prozesse

⁴⁴⁴ Vgl. Höppner/Uhl (2011): Status-quo der bauleistungslogischen Planung und die Auswirkungen für die Materialversorgung, S. 215 f.

⁴⁴⁵ Vgl. Schmidt (2003): Wettbewerbsfaktor Bauleistungslogistik, S. 22

⁴⁴⁶ Vgl. Schmidt (2003): Wettbewerbsfaktor Bauleistungslogistik, S. 142 ff.

als auch horizontal, im Sinne einer unternehmensübergreifenden Flussintegration zusammenzuführen. Darüber hinaus sind für die Erreichung eines maximalen Projektergebnisses aller Projektbeteiligten die einzelnen Wertschöpfungsketten einer vertikalen Flussintegration zu unterziehen.⁴⁴⁷

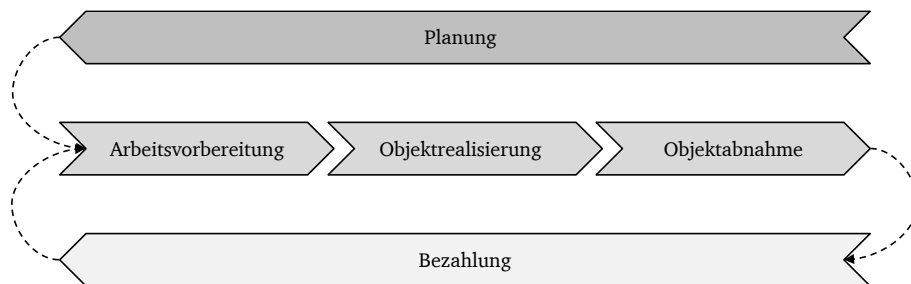


Abbildung 25: Projekt-Supply-Chain eines Bauprojekts⁴⁴⁸

Fortführend zur theoretischen Modellierung der Projekt-Supply-Chain untersucht SCHMIDT die Supply-Chain der Baustoffe im Rahmen des Auftragsabwicklungsprozesses von Wohnungsbauprojekten und stellt die identifizierten Probleme sowie die damit verbundenen Ursachen-Wirkungs-Beziehungen mit Hilfe von Statusbäumen dar. Die für die vorliegende Arbeit relevantesten Probleme sind bspw. die geringen Kenntnisse des Baustoffhandels und der Baustoffindustrie über die organisatorischen Anforderungen der Baustelle, die nicht prozessorientierte und zeitlich getaktete Baustoffbestellung seitens der Baustoffverarbeiter und damit verbunden der fehlende Einsatz von Warenwirtschaftssystemen auf Baustellen sowie die fehlende Integration der Warenwirtschaftssysteme der Baustoffzulieferer in die Bauproduktionsprozesse. Des Weiteren ist ein nicht standardisierter und teilweise fehlerhafter und unvollständiger Bestellprozess zu konstatieren, der durch die Tendenz zum Aufbau von Sicherheitsbeständen zu verfrühten Bestellungen von zu viel Baustoffen führen kann. Darüber hinaus wird festgestellt, dass vor allem in den frühen Projektphasen der Planung und Vergabe die Möglichkeiten zur Gestaltung einer Projekt-Supply-Chain begrenzt sind.⁴⁴⁹

Als Gestaltungsempfehlungen zum Management der Projekt-Supply-Chain und explizit der Supply-Chain der Baustoffe formuliert SCHMIDT monetäre Anreizsysteme, die notwendige Identifikation von Ressourcenengpässen sowie die prozessorientierte anstatt titelweise Gliederung von Leistungsverzeichnissen. Außerdem sollte die Auftragsvergabe zum frühestmöglichen Zeitpunkt erfolgen und den Aufbau von vertrauensvollen und effizienten Kooperationsbeziehungen fokussieren. Dies geht einher mit der Forderung nach bedarfs- und wertorientierten Kommunikationsnetzwerken sowie der wertschöpfenden Gestaltung und Integration der Prozessflüsse der Bauplanung, der Bauausführung und der Baustellenversorgung. Die versorgungsorientierte Supply-Chain wird zur bedarfsorientierten Demand-Chain.

⁴⁴⁷ Vgl. Schmidt (2003): Wettbewerbsfaktor Baulogistik, S. 187 f.

⁴⁴⁸ In Anlehnung an Schmidt (2003): Wettbewerbsfaktor Baulogistik, S. 143 weiterentwickelt

⁴⁴⁹ Vgl. Schmidt (2003): Wettbewerbsfaktor Baulogistik, S. 261 ff.

Dies überführt das bisherige Push-Prinzip der Baustoffversorgung in ein unternehmensübergreifendes Pull-Prinzip der Baustoffbedarfe. Als Werkzeug zur Umsetzung dieser Kommunikationsnetzwerke werden die Nutzung moderner Informations- und Kommunikationstechnologien sowie die Standardisierung des überbetrieblichen Datenaustauschs empfohlen.⁴⁵⁰ Bei den Ausführungen zu den Gestaltungsempfehlungen werden konkrete Vorschläge für die reale Umsetzung seitens des Verfassers, bspw. für die Realisierung von prozessorientierten Leistungsverzeichnissen in der Praxis, vermisst. Die praktische Umsetzung der o. g. Gestaltungsempfehlungen ist daher kritisch zu hinterfragen.

GOLDENBERG entwickelt im Kontext moderner Informations- und Kommunikationstechnologien ein Modell für den Einsatz mobiler Applikationen im Supply-Chain-Management für das Bauwesen. Die Anwendungen der mobilen Applikationen beinhalten innerhalb des Modells die Komponenten einer mobilen Lohnrückmeldung im Sinne einer tagesaktuellen mobilen Eingabe der Lohnstunden, einer mobilen Materialanforderung über eine Such- und Bestellmaske sowie eines elektronischen Lieferscheins. Darüber hinaus ist eine Push-to-Talk Funktion und eine Lokalisierung der LKWs mittels Telemetrie implementiert.⁴⁵¹ Das Modell vernetzt somit in Echtzeit das Supply-Chain-Management, die Beschaffung, die Bauausführung sowie die Distribution miteinander und enthält zudem kollaborative Elemente für die Zusammenarbeit mit den Lieferanten. Die elektronische Abbildung der Prozesse ermöglicht u. a. eine verkürzte Prozessdauer, eine Beschleunigung der administrativen Bestellvorgänge durch die Vermeidung von Medienbrüchen sowie eine Automatisierung von manuellen Bestellprozessen. Durch die Evaluation des Modells anhand der Effizienzkriterien Kosten, Termine und Risikominimierung konnten die Potenziale bei der Anwendung mobiler Applikationen im Vergleich zur vorab durchgeführten Ist-Prozessanalyse bestätigt werden. Hervorzuheben sind im Kontext der vorliegenden Arbeit die Effizienzsteigerungen durch mobile und papierlose Bestellungen sowie die Nutzung von Lokalisierungstechnologien.⁴⁵²

⁴⁵⁰ Vgl. Schmidt (2003): Wettbewerbsfaktor Baulogistik, S. 277 ff.

⁴⁵¹ Vgl. Goldenberg (2005): Optimierung von Supply Chain Prozessen in der Bauwirtschaft durch mobile Technologien und Applikationen, S. 198 ff.

⁴⁵² Vgl. Goldenberg (2005): Optimierung von Supply Chain Prozessen in der Bauwirtschaft durch mobile Technologien und Applikationen, S. 280 ff.

3.2 Warenverteilzentren

Zur Einordnung der Ausführungen zu Warenverteilzentren in der Bauindustrie werden zu Beginn des nachfolgenden Unterkapitels die unterschiedlichen Ansätze, Aufgaben sowie erkennbaren Potenziale und positiven Effekte von Warenverteilzentren in der Logistikbranche aufgezeigt. Nach der Darstellung des Baustellenversorgungsprozesses über ein Warenverteilzentrum und in diesem Zuge den Erläuterungen zu den allgemeinen Ausprägungen und Grundfunktionen von Warenverteilzentren in der Bauindustrie erfolgt, auf Basis bereits durchgeführter und dokumentierter Projekte eine Diskussion und Analyse zum gegenwärtigen Stand hinsichtlich des Einsatzes von Warenverteilzentren in der Bauindustrie. Die durchgeführte branchenspezifische Diskussion und Analyse bezieht sich dabei auf die Potenziale und die positiven Auswirkungen eines Warenverteilzentrums in der Bauindustrie und beinhaltet in diesem Kontext Ausführungen zu möglichen Haftungsfragen, Kosten und Betreibermodellen. Darüber hinaus werden im Rahmen der Analyse und Diskussion nötige Entscheidungshilfen auf Projekt- und Materialebene angesprochen.

3.2.1 Warenverteilzentren in der Logistikbranche

Über externe Transportprozesse sind Lieferanten und Kunden miteinander verbunden. Diese Transportprozesse sind Teil des Systems der Güterbereitstellung, -verwendung und -verteilung. Der durch dieses System dargestellte Güterfluss kann mittels einstufiger, mehrstufiger oder kombinierter Logistiksysteme realisiert werden. Bei der realen Umsetzung der Transportprozesse und des Güterflusses können verschiedene Konzepte respektive Logistiksysteme vorgefunden werden. Hierbei ist anzumerken, dass in der Literatur eine Vielzahl an Konzepten zu finden ist, die sich zwar in Details unterscheiden, im Wesentlichen aber auf den gleichen Grundsätzen und -funktionen basieren. Abbildung 26 sowie die nachfolgende Übersicht abstrahieren daher die entsprechenden Konzepte und dienen als Generalisierung der für die vorliegende Arbeit relevanten Konzepte.

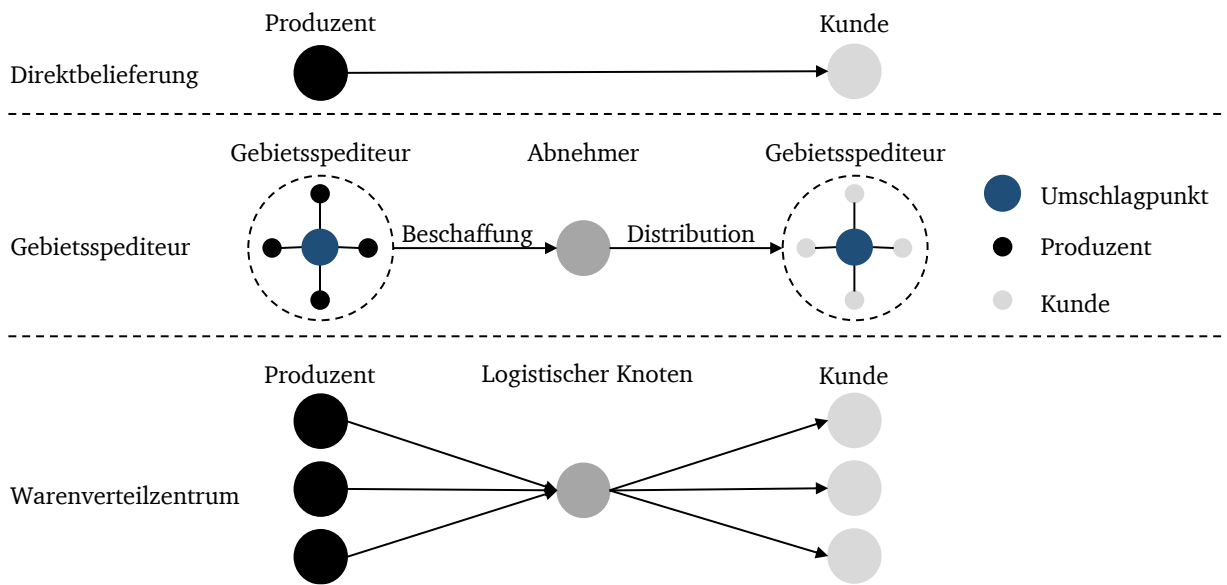


Abbildung 26: Konzepte der Beschaffungs- und Distributionslogistik⁴⁵³

Hinsichtlich der Distributionslogistik aus Sicht des Lieferanten respektive der Beschaffungslogistik aus Sicht des Kunden, als Subsysteme des gesamten Logistiksystems, sind hauptsächlich die folgenden Ansätze zu unterscheiden:^{454, 455, 456, 457, 458, 459}

- **Direktbelieferung:** Die Lieferung erfolgt vom Produzenten direkt zum Kunden ohne weitere Zwischenstufen. Es entsteht ein einstufiges Logistiksystem mit einem direkten Güterfluss.
- **Gebietsspediteur:** Durch einen vom Abnehmer beauftragten Logistikdienstleister oder mittels des eigenen Fuhrparks werden innerhalb eines definierten Gebiets verschiedene Lieferungen bei mehreren Lieferanten oder Produzenten eingesammelt und zu einem Umschlagpunkt transportiert und hier gebündelt. Es entsteht ein mehrstufiges Logistiksystem mit einem indirekten Güterfluss. Vom Umschlagpunkt aus erfolgt der Transport zum Abnehmer unter möglichst maximaler Ausnutzung der Lieferfahrzeuge. Tägliche identische Sammeltouren werden als Milk Runs bezeichnet. Das System des Gebietsspediteurs kann neben dem beschriebenen Einsatz innerhalb der Beschaffungslogistik auch bei der Distributionslogistik eingesetzt werden.

⁴⁵³ Eigene Darstellung

⁴⁵⁴ Vgl. Fleischmann/Kopfer (2018): Systeme der Transportlogistik, S. 20 ff.

⁴⁵⁵ Vgl. Wagner (2002): City-Logistik als Teil der Supply-Chain, S. 115

⁴⁵⁶ Vgl. Gleißner/Femerling (2008): Logistik, S. 155 und S. 186 f.

⁴⁵⁷ Vgl. Heiserich et al. (2011): Logistik, S. 309

⁴⁵⁸ Vgl. Schuh et al. (2013): Distributionslogistik, S. 129 ff.

⁴⁵⁹ Vgl. DIN EN 14943 (2006): Transportdienstleistungen – Logistik – Glossar, S. 30

- Warenverteilzentrum (Logistikzentrum, Güterverteilzentrum, Zentralverteilager, Distributionszentrum, Versorgungszentrum, Umschlagzentrum): Warenverteilzentren sind logistische Knoten innerhalb eines Logistiksystems, an denen Waren gesammelt, gebündelt, gelagert, umgeschlagen oder verteilt werden. Der Fokus der Warenverteilzentren liegt in der empfangsorientierten Bündelung oder Sortierung der Waren und Güter. Der Kommissionierungsprozess hat daher innerhalb eines Warenverteilzentrums eine besondere Relevanz. Für ein Warenverteilzentrum besonders geeignete Waren sind Stück- und Kleingüter, Pakete sowie im Allgemeinen palettierbare Produkte. Ein Warenverteilzentrum entspricht einem mehrstufigen Logistiksystem mit einem indirekten Güterfluss über ein Konzentrations- oder Auflösungspunkt. Ein in der Literatur auf Grund der Relevanz für den Einzelhandel oftmals gesondert aufgeführtes Konzept, ist das Cross-Docking. Beim Cross-Docking handelt es sich um ein Warenverteilzentrum, bei dem die Relationen zwischen den Produktionsstätten und den einzelnen Handelsfilialen des Unternehmens im Fokus stehen und die Waren über Kreuz umgeschlagen werden. Hierzu werden die eingehenden Lieferungen aufgeteilt und nach Lieferungen mit demselben Zielort sortiert, zusammengefasst und unmittelbar für den Versand und den weiteren Transport vorbereitet. Die Lieferfahrzeuge der verschiedenen Lieferanten docken am Wareneingang des Lagers an und Lieferfahrzeuge zur Auslieferung docken am Warenausgang an. Anschließend werden die Lieferfahrzeuge mit den Waren der unterschiedlichen Lieferanten beladen. Ein Bestandspuffer ist dabei nicht vorgesehen. Dies führt zu einer hohen Anforderung an die Zuverlässigkeit. Es ist zwischen einem einstufigen und zweistufigen Cross-Docking zu unterscheiden. Beim einstufigen Cross-Docking werden die Waren bereits vorab filialspezifisch kommissioniert. Beim zweistufigen Cross-Docking werden sorten- oder artikelreine Paletten geliefert. Die filialspezifische Kommissionierung erfolgt in diesem Fall erst am Umschlagpunkt im Zuge des Cross-Dockings.

Im weiteren Verlauf stehen das Konzept und die Grundzüge des Warenverteilzentrums im Fokus. Dies ist mit den in Kapitel 3.2.2 geschilderten Potenzialen eines Warenverteilzentrums im Kontext der Baustellenversorgung zu begründen. Im Allgemeinen können Warenverteilzentren durch eine Beschaffungs-, Zulauf-, Bestands- sowie einer Funktionsbündelung zu positiven Effekten führen. Diese erhöhen die Logistikqualität, reduzieren die Kosten und verbessern den Servicegrad.⁴⁶⁰ Zur weiteren Vertiefung der positiven Effekte sei auf GUDEHUS⁴⁶¹ verwiesen. Im Speziellen sind im Bauwesen durch Warenverteilzentren u. a. eine sicherere produktionssynchrone Materialbereitstellung nach dem JIT- und JIS-Prinzip, eine

⁴⁶⁰ Vgl. Gudehus (2010): Logistik, S. 27

⁴⁶¹ Vgl. Gudehus (2010): Logistik, S. 28 ff.

zielführendere Umsetzung des Pull-Prinzips, eine Verwendung von standardisierten Ladungsträgern und genormten Ladeeinheiten sowie eine Bündelung der Versorgungsströme und damit verbunden die Generierung von Versorgungspaketen denkbar. Die positiven Auswirkungen und Potenziale, die sich durch die Integration eines Warenverteilzentrums in das baulogistische System ergeben können, werden in Kapitel 3.2.2 weiterführend thematisiert.

Der Konzentrations- respektive Auflösungspunkt, der durch die Einbindung eines Warenverteilzentrums innerhalb des Logistiksystems entsteht, stellt ein Lager dar. An dieser Stelle soll nochmals die Aufgabe des Warenverteilzentrums als Verteillager, bei dem kommissioniert und konsolidiert wird, herausgestellt werden. Von untergeordneter Bedeutung und zu vermeiden ist die Schaffung von Vorrats- und Pufferlagern⁴⁶². Als Konsolidierung ist dabei das „Zusammenfassen kleinerer Warensendungen in eine große Sendung zur Beförderung als größere Einheit“⁴⁶³ zu verstehen und als Kommissionierung das „Zusammenstellen der zu einem Kundenauftrag gehörenden Waren in einem Lager.“⁴⁶⁴

Trotz der unterschiedlichen Anforderungen an das Warenverteilzentrum sowie den vielfältigen Realisierungsmöglichkeiten der Prozesse und der technischen Systemgestaltung können existierende Standardabläufe festgestellt werden. Diese typischen und grundlegenden Abläufe sind auch damit zu begründen, dass das Warenverteilzentrum, wie bereits erläutert, ein Knoten innerhalb einer übergeordneten Supply-Chain ist. Innerhalb des Warenverteilzentrums werden in zeitlicher Abfolge im Wesentlichen die Prozesse der Warenannahme und des Wareneingangs, der (kurzfristigen) Lagerung, der Kommissionierung sowie der Auftragszusammenfassung, der Verpackung und des Warenausgangs mit dem Versand durchlaufen.⁴⁶⁵ Eine ausführliche Darstellung zu den einzelnen Prozessen und Funktionen in einem Lager ist in TEN HOMPEL/SCHMIDT⁴⁶⁶ zu finden.

Die Gestaltung der Grundfunktionen und -prozesse innerhalb des Warenverteilzentrums hat unmittelbare Auswirkungen auf das Gesamtsystem Warenverteilzentrum. Auf die Vielzahl an Möglichkeiten im Kontext der innerbetrieblichen Förder- und Transportsysteme, der Kommissionierungssysteme, der Lagersysteme sowie der Verpackungssysteme und der Lagerverwaltungssysteme und deren Auswirkungen bspw. auf die Lagerdimensionierung und das Lagerlayout soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden.

⁴⁶² Zu den verschiedenen Lagertypen vgl. Jünemann (1989): Materialfluß und Logistik, S. 143 f.

⁴⁶³ DIN EN 14943 (2006): Transportdienstleistungen – Logistik – Glossar, S. 27

⁴⁶⁴ DIN EN 14943 (2006): Transportdienstleistungen – Logistik – Glossar, S. 81

⁴⁶⁵ Vgl. ten Hompel/Schmidt (2010): Warehouse Management, S. 23 ff.

⁴⁶⁶ Vgl. ten Hompel/Schmidt (2010): Warehouse Management, S. 23 ff.

3.2.2 Warenverteilzentren in der Bauindustrie

Durch ein Warenverteilzentrum in der Bauindustrie entsteht innerhalb des Logistiksystems ein Knoten, der sowohl als Auflösungs- als auch als Konzentrationspunkt betrachtet werden kann. Der logistische Knoten kann zum einen von mehreren Lieferpunkten in Form von bspw. Baustofflieferanten und -herstellern genutzt werden und zum anderen mehrere Empfangspunkte in Form von mehreren Baustellen andienen. Der Knoten ist dabei der Versorgungslogistik der Baustelle vorgelagert. Ebenso ist ein nachgelagerter Knoten im Kontext der Entsorgungslogistik der Baustelle möglich. Im weiteren Verlauf wird schwerpunktmäßig die Diskussion des vorgelagerten Knotens geführt. In Abbildung 27 ist die Versorgung einer Baustelle mit einem Warenverteilzentrum einer Versorgung ohne Warenverteilzentrum gegenübergestellt.

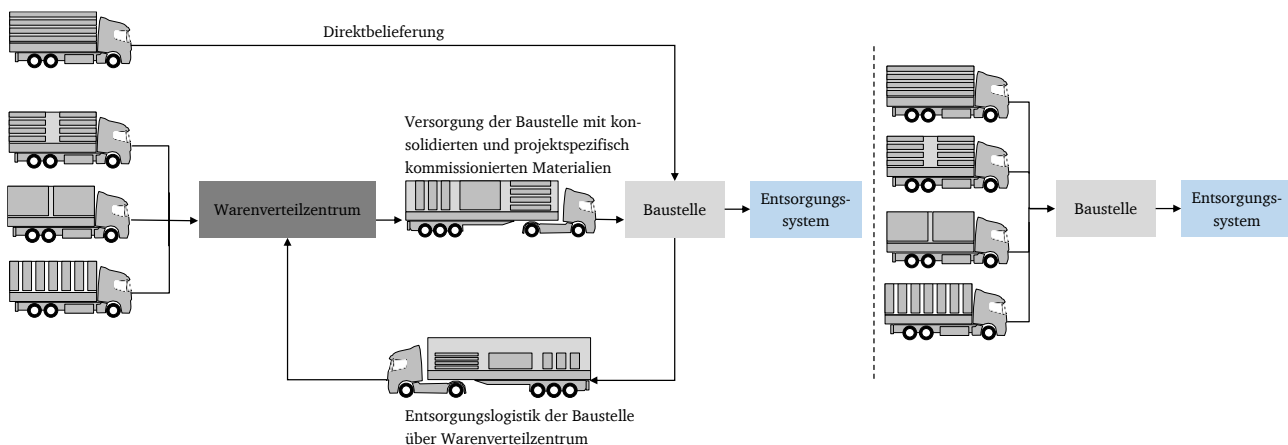


Abbildung 27: Gegenüberstellung der Versorgung einer Baustelle mit und ohne Warenverteilzentrum⁴⁶⁷

Hinsichtlich der realen Ausprägung können, abhängig vom Standort und der Anzahl der zu beliefernden Baustellen, drei Grundformen eines Warenverteilzentrums unterschieden werden. Die erste Möglichkeit wird durch ein internes „verstecktes“ oder „verborgenes“ Warenverteilzentrum innerhalb des Projektraums charakterisiert. Als weitere Möglichkeit können Warenverteilzentren außerhalb des Projektraums realisiert werden. Hierbei ist weiterführend zu differenzieren, ob diese externen Warenverteilzentren von einer oder von mehreren Baustellen genutzt werden. Es sei angemerkt, dass sich durch interne Warenverteilzentren nicht alle Vorteile eines Warenverteilzentrums realisieren lassen. Außerdem müssen innerhalb des Projektraums entsprechende Ressourcen wie bspw. Flächen zur Verfügung stehen.^{468, 469, 470}

⁴⁶⁷ In Anlehnung an Transport for London (2016): The Directory of London Construction Consolidation Centres, S. 9

⁴⁶⁸ Vgl. Motzko et al. (2019): Zur Relevanz der Baulogistikplanung, S. 89

⁴⁶⁹ Vgl. Lundesjö (2015): Consolidation centres in construction logistics, S. 237 ff.

⁴⁷⁰ Vgl. Sullivan et al. (2010): Managing Construction Logistics, S. 177

Im weiteren Verlauf der Arbeit stehen externe Warenverteilzentren, die von einer Baustelle genutzt werden, im Fokus.

Beim Einsatz eines Warenverteilzentrums erfolgt die durch einen Materialabruf ausgelöste Lieferung nicht direkt auf die Baustelle, sondern in das Warenverteilzentrum. Der Lieferumfang zum Warenverteilzentrum kann dabei ohne direkte Auswirkungen auf den Projektraum, individuell für jedes Gewerk nach der wirtschaftlichsten und ökologischsten Auslastung der Lieferfahrzeuge ausgerichtet werden. Nach LUNDESJÖ⁴⁷¹ sollte die Menge der eingelagerten Materialien den Materialbedarf von 14 Tagen nicht überschreiten. Damit soll der Entstehung von Vorratslagern entgegengewirkt werden. Der Schwerpunkt eines Warenverteilzentrums sollte in der logistischen Konsolidierung und projektspezifischen Kommissionierung der Materialien liegen.⁴⁷² Auf die benötigten Entscheidungshilfen hinsichtlich der Eignungsprüfung von Materialien im Kontext der Nutzung von Warenverteilzentren wird im späteren Verlauf der Arbeit eingegangen.

Die Prozesse, die innerhalb eines Warenverteilzentrums in der Bauindustrie durchlaufen werden, können grundsätzlich anhand der Ausführungen zu Warenverteilzentren in der Logistikbranche abgeleitet werden. Die benötigte Infrastruktur zur Durchführung der Prozesse ist branchenspezifisch sowie projekt- und produktspezifisch zu gestalten. Prinzipiell sind dieselben Anforderungen zu erfüllen wie bei Warenverteilzentren in der Logistikbranche. Die in diesem Kontext angesprochene Vielfalt der zur Verfügung stehenden Systeme nimmt durch die spezifischen Betrachtungen ab. An dieser Stelle sei auf die besondere Relevanz und die Notwendigkeit von branchenspezifischen Lagerverwaltungssystemen hingewiesen und in diesem Kontext auf die eindeutige Kennzeichnung der Ladeeinheiten inklusive aller benötigten Informationen für den Versorgungsprozess sowie die Identifikation und Lokalisierung der Materialien verbunden mit der Überwachung und Digitalisierung des Materialflusses.

Der Standort eines Warenverteilzentrums sollte innerhalb des Spannungsfelds zwischen einer verkehrsgünstigen Lage für die Belieferung des Warenverteilzentrums und einer möglichst geringen Distanz zur Baustelle diskutiert und abgewogen werden.⁴⁷³ In der Literatur werden eine Fahrzeit zwischen Baustelle und Warenverteilzentrum von nicht mehr als 30 bis 45 Minuten⁴⁷⁴ respektive eine Distanz zwischen Baustelle und Warenverteilzentrum von nicht mehr als 10 km⁴⁷⁵ genannt.

⁴⁷¹ Vgl. Lundesjö (2015): Consolidation centres in construction logistics, S. 228

⁴⁷² Vgl. Motzko et al. (2019): Zur Relevanz der Baulogistikplanung, S. 88

⁴⁷³ Vgl. Motzko et al. (2019): Zur Relevanz der Baulogistikplanung, S. 89

⁴⁷⁴ Vgl. Lundesjö (2015): Consolidation centres in construction logistics, S. 240

⁴⁷⁵ Vgl. Sullivan et al. (2010): Managing Construction Logistics, S. 181

Die Konsolidierung und Kommissionierung von verschiedenen Materialien innerhalb eines Warenverteilzentrums und die darauffolgende Lieferung zur Baustelle können zu einer verbesserten Versorgungslogistik der Baustelle führen. Durch den Einsatz eines Warenverteilzentrums, welches die Baulogistik und im Speziellen die Versorgungslogistik zentral organisiert und koordiniert, können die einzelnen Versorgungsprozesse respektive Versorgungspakete der Gewerke miteinander integriert werden. Außerdem kann eine produktionssynchrone Disposition der Materialien nach dem Pull-Prinzip und in diesem Kontext eine JIT-Anlieferung sowohl nach Taktbereichen und Tagesbedarf der Gewerke als auch direkt zum Arbeitsplatz ohne Zwischenlagerungen auf der Baustelle realisiert werden. Direkte JIT-Anlieferungen durch einen Hersteller oder Lieferanten können zu unausgelasteten Lieferfahrzeugen oder einer nicht produktionssynchronen Versorgung führen. Aus einer nicht produktionsynchronen Versorgungslogistik der Baustelle resultieren Lagerbestände, die das Prinzip einer JIT-Belieferung konterkarieren. Darüber hinaus sind externe JIT-Belieferungen in der Regel dezentral organisiert und daher schwer steuerbar. Durch das System Warenverteilzentrum können Materialbedarfe verschiedener Gewerke auf einem Lieferfahrzeug gebündelt werden. Diese Bündelung der Güterströme führt zu einer durchgängigen Auslastung der Lieferfahrzeuge. Ferner lassen sich JIT-Belieferungen durch ein Warenverteilzentrum zentral organisieren und somit einfacher steuern.⁴⁷⁶

Die erkennbaren und genannten Potenziale, die sich durch die Integration eines Warenverteilzentrums in das baulogistische System ergeben können, sollen anhand durchgeführter und dokumentierter Projekte bestätigt werden. Da eine vollumfängliche wissenschaftliche Untersuchung dem Verfasser hierzu nicht bekannt ist, werden publizierte Projektberichte und Studien analysiert. Darauf aufbauend werden, die Potenziale, die sich durch das System Warenverteilzentrum ergeben können, generalisierend dargestellt. Die Auswirkungen werden dabei auf Grund der Bandbreite der numerischen Werte zusammenfassend qualitativ beschrieben. Es wurden schwerpunktmäßig folgende Projekte respektive Warenverteilzentren untersucht:

- Hammarby Sjöstad, Stockholm: Warenverteilzentrum für innerstädtisches Stadtentwicklungsgebiet; Realisierung von ca. 8.000 Wohnungen sowie öffentlichen Einrichtungen und Büro- und Gewerbeimmobilien; Betrieb des Warenverteilzentrums von 2001 bis 2004 am Rand des Projektgebiets; Nutzung durch mehrere Baustellen des Projekts; öffentliche finanzielle Unterstützung bei der Umsetzung und dem Betrieb.⁴⁷⁷

⁴⁷⁶ Vgl. Motzko et al. (2019): Zur Relevanz der Baulogistikplanung, S. 88 f.

⁴⁷⁷ Vgl. SUCCESS (2017): Business models for construction logistics optimisation and CCC introduction, S. 12 f.

- London Construction Consolidation Centre: Warenverteilzentrum für mehrere innerstädtische Baustellen in London seit 2005; zunächst als Pilotstudie für zwei Jahre geplant und mit öffentlichen Finanzmitteln unterstützt; anschließend Betreiber- und Standortwechsel.⁴⁷⁸
- Potsdamer Platz, Berlin: Warenverteilzentrum in unmittelbarer Nähe zur größten Baustelle Europas in den 1990er Jahren mit eigens errichteter Verkehrsinfrastruktur; Gründung einer gemeinsamen GmbH durch die Investoren und Bauträger im Kontext des Warenverteilzentrums.⁴⁷⁹

In London können darüber hinaus eine Vielzahl^{480, 481} weiterer Warenverteilzentren festgestellt werden. Neben den im Folgenden formulierten Auswirkungen, sind als ein weiterer Grund für die Vielzahl an Warenverteilzentren in London auch die ortspezifischen innerstädtischen Mautgebühren zu nennen.

Auf Basis der untersuchten Publikationen können folgende positive Auswirkungen durch die Integration eines Warenverteilzentrums in das baulegistische System erkannt und bestätigt werden:^{482, 483, 484, 485, 486, 487, 488, 489}

- Reduzierung der Fahrzeuganzahl zur Baustelle und damit verbunden eine Reduzierung des innerstädtischen Verkehrsaufkommens,
- Reduzierung der Fahrstrecken und -zeiten für die Hersteller und Lieferanten,
- Reduzierung des Emissionsausstoßes,
- Erhöhung der Fahrzeugauslastung,
- Erhöhung der Lieferzuverlässigkeit,
- Erhöhung der Lieferflexibilität,
- Reduzierung von Diebstählen und Materialschäden,
- Reduzierung der Warte- und Entladezeiten der Lieferfahrzeuge auf der Baustelle,

⁴⁷⁸ Vgl. SUCCESS (2017): Business models for construction logistics optimisation and CCC introduction, S. 14 ff.

⁴⁷⁹ Vgl. Etter (1998): Baustellenlogistik für den Potsdamer Platz, S. 428

⁴⁸⁰ Vgl. Transport for London (2016): The Directory of London Construction Consolidation Centres

⁴⁸¹ Vgl. SUCCESS (2017): Business models for construction logistics optimisation and CCC introduction

⁴⁸² Vgl. Etter (1998): Baustellenlogistik für den Potsdamer Platz

⁴⁸³ Vgl. Ottosson (2005): Evaluation report – New Concepts for the Distribution of Goods (WP 9)

⁴⁸⁴ Vgl. Department for Transport (2007): Freight Best Practice. London Construction Consolidation Centre – Case Study

⁴⁸⁵ Vgl. Transport for London (2008): London Construction Consolidation Centre – Final Report

⁴⁸⁶ Vgl. Campbell et al. (2010): Freight Consolidation Centre Study – Final Report

⁴⁸⁷ Vgl. Lundeşjö (2011): Using Construction Consolidation Centres to reduce construction waste and carbon emissions

⁴⁸⁸ Vgl. Transport for London (2016): The Directory of London Construction Consolidation Centres

⁴⁸⁹ Vgl. SUCCESS (2017): Business models for construction logistics optimisation and CCC introduction

- Reduzierung der Zwischenlagerungen und der Lagerflächenbedarfe auf der Baustelle und damit verbunden eine systematische und arbeitsplatznahe Lagerung kleinster Bestände,
- Reduzierung der Behinderungen respektive der Beeinflussungen der Logistikprozesse auf die Ausführungsprozesse,
- standardisierte Lieferprozesse zwischen Warenverteilzentrum und Baustelle in Verbindung mit standardisierten und emissionsärmeren Lieferfahrzeugen,
- zentrale Materialflusssteuerung und damit verbunden eine zentrale Informationsflusssteuerung,
- Möglichkeit einer genehmigungsabhängigen respektive -pflichtigen nächtlichen Versorgung der Baustelle,
- Möglichkeit der Vormontage und Vorfertigung innerhalb des Warenverteilzentrums,
- Unterstützung und Vereinfachung bei der Umsetzung von Ansätzen einer Lean Construction oder einer Lean Logistics und hier im Speziellen durch eine JIT- und JIS-Anlieferung eine produktionssynchrone Materialversorgung pro Taktbereich und Arbeitsplatz,
- Produktivitätssteigerungen durch eine Fokussierung der Arbeitskräfte auf die Haupttätigkeiten und deren prozentuale Erhöhung.

Die dargestellten Auswirkungen der Integration eines Warenverteilzentrums in das baulogistische System können ebenfalls anhand durchgeführter Experteninterviews und deren Auswertungen im Rahmen von Abschlussarbeiten^{490, 491, 492, 493, 494, 495, 496, 497} bestätigt werden.

Neben der Darstellung von realen Warenverteilzentren werden im Zuge des Projekts SUCCESS (Sustainable Urban Consolidation CentrES for conStruction) die Auswirkungen von Warenverteilzentren auch simuliert. Grundlage der Simulationen sind vier reale innerstädtische Projekte in Luxemburg, Paris, Valencia und Verona und die damit in Verbindung ste-

⁴⁹⁰ Vgl. Deuringer (2021): Eine Untersuchung zum Einsatz des Baulogistikprozessmodells und zur Bewertung der baulogistischen Komplexität in Abhängigkeit der Unternehmenseinsatzform

⁴⁹¹ Vgl. Farid (2021): Eine Analyse zur JIT-Belieferung in der stationären Industrie und deren Übertragbarkeit auf die Bauindustrie

⁴⁹² Vgl. Gammersbach (2021): Erstellung von Projektprofilen im Kontext des Systems „Warenverteilzentrum“ in der Bauwirtschaft

⁴⁹³ Vgl. Grieser (2021): Entwicklung von Projektprofilen im Kontext des Systems „Warenverteilzentrum“ in der Bauwirtschaft

⁴⁹⁴ Vgl. Lerche (2021): Eine Analyse von Warenverteilzentren in der Bauwirtschaft im Kontext der Organisation, der Koordination sowie der Initiatoren und Betreiber

⁴⁹⁵ Vgl. Losacker (2018): Eine Analyse des Kommissionierungsprozesses beim Betrieb von Warenverteilzentren in der Bauwirtschaft

⁴⁹⁶ Vgl. Sauer (2020): Eine Untersuchung zu Warenverteilzentren in der Bauwirtschaft im Kontext der Organisation sowie der Initiatoren und Betreiber

⁴⁹⁷ Vgl. Zellner (2022): Eine Studie zur Integration des Systems Warenverteilzentrum in ein bestehendes Baulogistikprozessmodell

henden und aufgenommenen Materialströme und Randbedingungen. Die Simulationen haben die positiven Auswirkungen eines Warenverteilzentrums bestätigt. Die positiven Auswirkungen konnten unter verschiedenen Simulationsszenarien sowohl bei allen Projekten als auch bei allen vorab definierten Indikatoren beobachtet werden. Als Indikatoren dienen die Fahrzeuganzahl, der Emissionsausstoß, die Fahrstrecke sowie die Fahrzeugauslastung.^{498, 499, 500, 501}

KANEKO et al.⁵⁰² untersuchen den Einsatz eines Warenverteilzentrums in Tokio bei sieben Bauprojekten kleiner und mittlerer Größe und bestätigen dessen positive Auswirkungen in Hinblick auf u. a. die Reduzierung des Emissionsausstoßes, der Fahrzeuganzahl zur Baustelle und der Entladezeit sowie der Möglichkeit einer Vormontage und Vorfertigung innerhalb eines Warenverteilzentrums.

VRIJHOEF⁵⁰³ untersucht drei Projekte verschiedenen Typs und mit unterschiedlicher Größe in zentraler Innenstadtlage in den Niederlanden und bestätigt ebenfalls die positiven Auswirkungen eines Warenverteilzentrums. Bei allen Projekten führt der Einsatz eines Warenverteilzentrums zu einer positiven Beeinflussung der vorab definierten Indikatoren. Als Indikatoren dienen auch hier die Lieferzuverlässigkeit, der Emissionsausstoß, die Warte- und Entladezeiten auf der Baustelle, die Fahrzeugauslastung sowie Produktivitätssteigerungen.

ARBULU/BALLARD⁵⁰⁴ verdeutlichen ebenso die Potenziale eines Warenverteilzentrums und stellen die Synergien in Bezug zu Lean-Ansätzen dar.

Im Hinblick auf Haftungsfragen und den Gefahrenübergang der Materialien sollten zwischen den am System Warenverteilzentrum Beteiligten vertragliche Regelungen getroffen werden. Im Kontext der Haftung und des Gefahrenübergangs sollten Qualitäts- und Quantitätskontrollen der Materialien beim Eintreffen der Lieferungen im Warenverteilzentrum sowie auf der Baustelle durchgeführt und dokumentiert werden.

Neben dem Thema der Haftung ist eine weitere Herausforderung der Aspekt der Kosten eines Warenverteilzentrums. Ein quantifizierter und belastbarer Kostenvergleich ist auf Grund der Vielzahl an Einflussfaktoren sowie erforderlicher Kostenkennwerte nicht zielführend möglich. Ebenso können den recherchierten Projektberichten und Studien keine validen Kostenvergleiche oder Kostenkennwerte entnommen werden. Bei einem Kostenvergleich müssen

⁴⁹⁸ Vgl. SUCCESS (2017): Business models for construction logistics optimisation and CCC introduction

⁴⁹⁹ Vgl. SUCCESS (2018): Final validation report for each site and long-term sites implementation plan

⁵⁰⁰ Vgl. Guerlain et al. (2019a): Decision Support Systems for Smarter and Sustainable Logistics of Construction Sites

⁵⁰¹ Vgl. Guerlain et al. (2019b): Understanding Construction Logistics in Urban Areas and Lowering Its Environmental Impact: A Focus on Construction Consolidation Centres

⁵⁰² Kaneko et al. (2007): Development of construction logistics system using radio frequency identification

⁵⁰³ Vrijhoef (2018): Improving efficiency and environmental impact applying JIT logistics and transport consolidation in urban construction projects

⁵⁰⁴ Arbulu/Ballard (2004): Lean supply systems in construction

die Kosten, die mit dem System Warenverteilzentrum in Verbindung stehen, den möglichen Kosteneinsparungen, die sich durch den Einsatz eines Warenverteilzentrums ergeben können, gegenübergestellt werden. Dieser Kostenvergleich soll im Folgenden grob qualitativ dargestellt werden. Zum einen entstehen bei der Planung und Errichtung eines Warenverteilzentrums fixe einmalige Kosten sowie im weiteren Verlauf des Betriebs variable mengen- und zeitabhängige Kosten. Diese variablen Kosten beinhalten die Vorhaltekosten der Infrastruktur sowie die Kosten zur Durchführung der logistischen und administrativen Prozesse. Dem gegenüber stehen mögliche Kosteneinsparungen, die sich aus den o. g. positiven Auswirkungen eines Warenverteilzentrums ergeben. Hierbei besteht die Herausforderung, dass die positiven Auswirkungen seitens der Beteiligten erkannt werden müssen und sich bspw. in entsprechend geringeren Materialpreisen seitens der Hersteller und Lieferanten oder geringeren Angebotspreisen seitens der ausführenden Gewerke auch widerspiegeln müssen. In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass Transportkosten oft nicht explizit ausgewiesen werden und im Materialpreis inkludiert sind. Dies erschwert die Identifizierung möglicher Kosteneinsparungen. Es ist davon auszugehen, dass bei Projekten, die für Warenverteilzentren besonders geeignet sind, die möglichen Kosteneinsparungen im Verlaufe des Projekts die Kosten für ein Warenverteilzentrum rechtfertigen. Diese These kann durch die Erfahrungen aus dem Warenverteilzentrum Hammarby Sjöstad und dem London Construction Consolidation Centre bestätigt werden. Beide Warenverteilzentren wurden zu Beginn mit öffentlichen Finanzmitteln unterstützt. In London wurde das Warenverteilzentrum auch nach Ende der Pilotstudie und ohne öffentliche finanzielle Unterstützung erfolgreich weiterbetrieben.⁵⁰⁵ In Stockholm konnte die öffentliche finanzielle Unterstützung sukzessive reduziert werden und gegenläufig die Preise für die Nutzung des Warenverteilzentrums sukzessive erhöht werden. Die Kunden des Warenverteilzentrums erkannten die Kosteneinsparpotenziale und waren bereit, für die Leistungen des Warenverteilzentrums erhöhte Preise zu bezahlen.⁵⁰⁶

Als Betreiber eines Warenverteilzentrums in der Bauindustrie sind grundsätzlich Baulogistikdienstleister und Bauunternehmungen aber auch Baustoffhändler und -lieferanten, die in diesem Fall dann ebenfalls als Baulogistikdienstleister zu betrachten sind, denkbar. Weiterhin sind öffentlich-private Partnerschaften möglich, bei denen die öffentliche Hand ein Warenverteilzentrum aus bspw. Umweltschutzgründen fördert oder durch ordnungspolitische Maßnahmen initiiert. Als privater Partner können hierbei die o. g. Betreiber fungieren. Beim Betrieb eines Warenverteilzentrums durch eine Bauunternehmung entsteht innerhalb der Bauunternehmung eine eigenständige Unternehmenseinheit respektive Kostenstelle, die die o. g. Kosten eines Warenverteilzentrums verursacht. Dem gegenüber entsteht beim Betrieb des Warenverteilzentrums durch einen Baulogistikdienstleister eine Organisationseinheit, die

⁵⁰⁵ Vgl. SUCCESS (2017): Business models for construction logistics optimisation and CCC introduction, S. 14 ff.

⁵⁰⁶ Vgl. Ottosson (2005): Evaluation report – New Concepts for the Distribution of Goods (WP 9), S. 46

Leistungen am Markt anbietet und dementsprechend Gewinne erwirtschaftet. Als Kunden dieser Organisationseinheit können Bauherrschaften oder Bauunternehmungen auftreten. Als Nachteil einer Beauftragung eines externen Baulogistikdienstleisters durch die Bauunternehmung können die sich ergebenden zusätzlichen Schnittstellen angesehen werden. Neben den o. g. Kosteneinsparungen kann ein weiterer Anreiz für das Betreiben eines eigenen Warenverteilzentrums durch eine Bauunternehmung die Prozessverbesserung und -stabilität der eigenen Ausführungsprozesse sein.⁵⁰⁷

Im Hinblick auf den Entscheidungsprozess, inwiefern sich ein Projekt für den Einsatz eines Warenverteilzentrums eignet, konnten keine ganzheitlichen und vollständigen Entscheidungshilfen eruiert werden. Als wesentliche Projektmerkmale, die den Einsatz eines Warenverteilzentrums rechtfertigen, werden häufig ein unzureichender Platzbedarf auf der Baustelle und damit verbunden die Notwendigkeit einer JIT-Anlieferung, eine innerstädtische Lage des Projekts sowie sicherheitsrelevante Aspekte des Projekts genannt. Des Weiteren werden behördliche Auflagen angeführt, die den Einsatz eines Warenverteilzentrums erforderlich machen.^{508, 509} Ein publiziertes Flussdiagramm⁵¹⁰ zur Entscheidungsfindung auf Basis der Projektmerkmale Materiallieferzeiten, Diebstahlrisiko, Platzbedarf, Zugangs- und Zufahrtssituation der Lieferfahrzeuge sowie sicherheitsrelevante Aspekte des Projekts zeigt hinsichtlich der konkreten Beurteilung der einzelnen Projektmerkmale und deren Auswirkungen auf die Entscheidungsfindung Verbesserungsbedarf. Die publizierte Entscheidungshilfe ist daher durch eigene Untersuchungen zu validieren und im Zuge dessen hinsichtlich der Beurteilung der Projektmerkmale zu konkretisieren sowie ggf. um weitere Projektmerkmale zu erweitern.

Neben einer fehlenden ganzheitlichen und vollständigen Entscheidungshilfe für den Einsatz eines Warenverteilzentrums auf Projektebene ist ebenso festzustellen, dass eine systematische Entscheidungshilfe auf Materialebene nicht vorliegt. In den publizierten Projektberichten und Studien werden lediglich konkrete Materialien aus der Sphäre des Rohbaus wie bspw. Frischbeton, Fertigteile oder Bewehrungsstahl genannt, die sich nicht für das System Warenverteilzentrum eignen. Es ist daher eine systematische Entscheidungshilfe auf Materialebene zu entwickeln. Ansatzpunkte für die Entscheidungshilfe stellen hierbei die Materialklassen⁵¹¹ Lagerprodukt, Massenprodukt und Entwicklungsprodukt sowie die ABC-, GMK- und RSU-Analyse, sowie deren Kombinationen dar. Die ABC-Analyse bringt Teile nach bestimmten Charakteristika in eine sequentielle Reihenfolge, ordnet die Teile den entsprechenden Klassen zu und unterteilt diese somit nach einem Wert-Mengenverhältnis. A-Teile sind

⁵⁰⁷ Vgl. Navarro-Correcher et al. (2018): Business models analysis of Construction Consolidation Centres, S. 6 ff.

⁵⁰⁸ Vgl. Sullivan et al. (2010): Managing Construction Logistics, S. 182

⁵⁰⁹ Vgl. Lundeşjö (2015): Consolidation centres in construction logistics, S. 240

⁵¹⁰ Vgl. Sullivan et al. (2010): Managing Construction Logistics, S. 216

⁵¹¹ Vgl. Kirsch (2009): Organisation der Bauproduktion nach dem Vorbild industrieller Produktionssysteme, S. 70 f.

eine kleine Gruppe an Teilen, die nach der ABC-Analyse und -Einstufung einen Großteil des Wertes ausmachen.^{512, 513} B-Teile sind Teile, die nach der ABC-Analyse und -Einstufung zu einer Gruppe an Teilen gehören, die den zweitgrößten Teil des Wertes bilden.⁵¹⁴ C-Teile bilden eine Gruppe an Teilen, die nach der ABC-Analyse und -Einstufung mengenmäßig eine große Anzahl an Teilen beinhalten, aber wertemäßig einen geringen Teil des Wertes besitzen.⁵¹⁵ Die GMK-Analyse differenziert die Materialien hinsichtlich ihres Volumens respektive ihrer Dimensionen und Sperrigkeit nach groß-, mittel-, und kleinvolumigen Teilen.⁵¹⁶ Die RSU-Analyse klassifiziert die Materialien nach ihrer Verbrauchsstruktur und damit verbunden ihrer Vorhersagegenauigkeit. Es sind Artikel mit regelmäßigem, schwankendem oder saisonalem und unregelmäßigem Verbrauch zu unterscheiden. Die RSU-Analyse kann auch synonym als XYZ-Analyse bezeichnet werden.⁵¹⁷

⁵¹² Vgl. DIN EN 14943 (2006): Transportdienstleistungen – Logistik – Glossar, S. 6

⁵¹³ Vgl. Wannenwetsch (2014): Integrierte Materialwirtschaft, Logistik und Beschaffung, S. 33

⁵¹⁴ Vgl. DIN EN 14943 (2006): Transportdienstleistungen – Logistik – Glossar, S. 12

⁵¹⁵ Vgl. DIN EN 14943 (2006): Transportdienstleistungen – Logistik – Glossar, S. 20

⁵¹⁶ Vgl. Wannenwetsch (2014): Integrierte Materialwirtschaft, Logistik und Beschaffung, S. 46

⁵¹⁷ Vgl. Wannenwetsch (2014): Integrierte Materialwirtschaft, Logistik und Beschaffung, S. 43

3.3 Sensorik

In der Einleitung wird als Ziel der vorliegenden Arbeit die Entwicklung eines Baustellenversorgungssystems formuliert. Hierbei sollen Sensoren im Kontext der Digitalisierung als unterstützendes Element für das zu entwickelnde Baustellenversorgungssystem zum Einsatz kommen. Das folgende Unterkapitel erläutert daher die hierzu wesentlichsten Grundlagen und dient zur Einordnung des im weiteren Verlauf dieser Arbeit entwickelten Systems. Darüber hinaus wird ein auf die relevanten Aspekte dieser Arbeit eingeschränkter kurzer Überblick zum Stand der Anwendung von Sensoren gegeben.

3.3.1 Ausgewählte Grundlagen zur Sensorik im Allgemeinen

Sensoren ermöglichen die Messung von physikalischen, chemischen, klimatischen, biologischen und medizinischen Größen sowie darauf aufbauend, die Feststellung und Auswertung des Ist-Zustands dieser Messgrößen.⁵¹⁸ Hierbei wird die Messung durch den Sensor in ein elektronisches Signal respektive eine digitale Darstellung umgewandelt und steht dem Menschen oder Geräten zur weiteren Bearbeitung zur Verfügung. Davon abzugrenzen sind Aktoren, die ein Signal empfangen und entsprechende Prozesse auslösen. In der Regel empfangen Aktoren ein elektronisches Signal respektive einen digitalen Befehl und lösen eine physikalische Größe wie bspw. eine Bewegung oder eine Kraft aus. Sensoren und Aktoren ergänzen sich, wie in Abbildung 28 dargestellt, gegenseitig.⁵¹⁹ Da beim entwickelten Baustellenversorgungssystem ausschließlich Sensorik zur Anwendung kommt, findet im weiteren Verlauf eine Fokussierung auf diese statt.

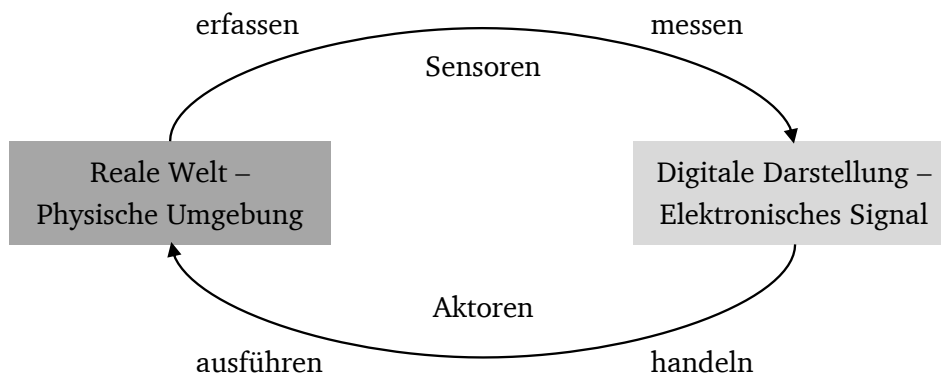


Abbildung 28: Interaktion von Sensoren und Aktoren mit der physischen Welt⁵²⁰

⁵¹⁸ Vgl. Hering/Schönfelder (2018): Sensoren in Wissenschaft und Technik, S. 1

⁵¹⁹ Vgl. Hanes et al. (2017): IoT Fundamentals: Networking Technologies, Protocols, and Use Cases for the Internet of Things, S. 141

⁵²⁰ In Anlehnung an Hanes et al. (2017): IoT Fundamentals: Networking Technologies, Protocols, and Use Cases for the Internet of Things, S. 142

Durch die Vielzahl der möglichen Messgrößen und damit verbunden der Vielzahl an Sensortypen ergeben sich mannigfaltige Möglichkeiten, Sensoren einzuteilen und zu kategorisieren. Die Einteilung und Kategorisierung können bspw. nach der Energieversorgung, dem Messprinzip, der Messgröße oder dem Einsatzort des Sensors auf der Baustelle erfolgen. Die Differenzierung hinsichtlich der Energieversorgung erfolgt in aktive und passive Sensoren. Aktive Sensoren benötigen zur Umwandlung der Messgröße in eine elektronische Größe, im Gegensatz zu passiven Sensoren, keine äußere Hilfsspannung. Bei der Differenzierung nach dem Messprinzip respektive den physikalischen Effekten wird nach den naturwissenschaftlichen Gesetzen unterschieden, auf denen die Umwandlung der Eingangs- in die Ausgangsgröße beruht. Des Weiteren kann eine Einteilung nach der zu messenden Größe selbst erfolgen.⁵²¹ Zur weiteren Vertiefung der naturwissenschaftlichen Gesetze, wie bspw. dem piezoelektrischen Effekt, den Effekten der Induktion und Kapazität sowie zu den Messgrößen, wie bspw. geometrische, mechanische oder zeitbasierte Messgrößen und weiteren elektrotechnischen Hintergründen der Sensorik, wird auf HERING/SCHÖNFELDER⁵²² und TRÄNKLER/REINDL⁵²³ verwiesen. MEHR unterteilt in Anlehnung an die medizinische Begriffsverwendung die Sensoren nach ihrem Einsatzort auf der Baustelle. Propriozeptive Sensoren sind hierbei innerhalb des Arbeitssystems direkt an einem Arbeitssystemelement angebracht und erfordern daher eine Datenübertragung per Funknetz. Exterozeptive Sensoren befinden sich außerhalb des beobachteten Arbeitssystems. Die Datengewinnung erfolgt somit auf Distanz. Die Datenübertragung und die Stromversorgung sind im Gegensatz zu propriozeptiven Sensoren kabelgebunden möglich.⁵²⁴

Die Datenübertragung der sensorisch erfassten Messsignale kann wie bereits ausgeführt kabelgebunden oder per Funknetz erfolgen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird der Fokus auf eine drahtlose Datenübertragung im Kontext des Internets der Dinge gelegt. Die drahtlose Datenübertragung kann über verschiedene Funk- respektive Kommunikationstechnologien realisiert werden. In Abhängigkeit zur u. a. gewählten Funk- respektive Kommunikationstechnologie kann der Einsatz von Gateways nötig werden. Das Gateway stellt dabei eine Schnittstelle zwischen dem Sensor und dem Speicher- und Auswertungsort der Daten dar. Die Datenübertragung erfolgt vom Sensor über das Gateway zum Speicher- und Auswertungsort der Daten.^{525, 526} Auf die für die Arbeit relevanten Funk- und Kommunikationstechnologien im Kontext ihres praktischen Einsatzes wird in Kapitel 4.2 im Rahmen der Konkre-

⁵²¹ Vgl. Hering/Schönfelder (2018): Sensoren in Wissenschaft und Technik, S. 2

⁵²² Hering/Schönfelder (2018): Sensoren in Wissenschaft und Technik

⁵²³ Tränkler/Reindl (2018): Sensortechnik

⁵²⁴ Vgl. Mehr (2012): Polysensorale Bauprozessidentifikation durch kognitive Systeme, S. 57 ff.

⁵²⁵ Vgl. Hanes et al. (2017): IoT Fundamentals: Networking Technologies, Protocols, and Use Cases for the Internet of Things, S. 110

⁵²⁶ Vgl. Mohamed (2019): The Era of Internet of Things, S. 5 f.

tisierung der eingesetzten Sensorik eingegangen. Die Auswahl einer Funk- und Kommunikationstechnologie ist von der konkreten Anwendung abhängig und damit verbunden der erforderlichen Reichweite, Datenrate und Batterielaufzeit. Diese Faktoren beeinflussen wiederum maßgeblich die Anschaffungskosten der Sensorik und der Funk- und Kommunikationstechnologie.

3.3.2 Ausgewählte Anwendungsbeispiele zur Sensorik im Baubetrieb

Durch den Einsatz von polysensoralen Systemen kann eine automatische Bauprozessidentifikation und damit verbunden eine Prozesssteuerung und -regelung in Echtzeit realisiert werden. Hierbei sind die Ansätze einer status- und ereignisbasierten Prozessidentifikation voneinander zu differenzieren. Beim statusbasierten Ansatz wird der Prozessverlauf mit Hilfe von zu diskreten Zeitpunkten aufgenommenen Daten, die zu Informationen verarbeitet werden, rekonstruiert. Hierzu erfolgt ein Abgleich der sensorisch erfassten Messwerte respektive Merkmale eines Prozesses mit einem Referenzmerkmalvektor. Beim ereignisbasierten Ansatz wird der Prozessverlauf kontinuierlich überwacht. Die kontinuierliche Überwachung ermöglicht anhand einer definierten Überschreitung eines Messwerts bei einer beobachteten Messgröße die Prozessidentifikation. Im Fokus der statusbasierten Identifikation steht der Prozessoutput, während die ereignisbasierte Identifikation den Arbeitsablauf überwacht.⁵²⁷

Neben der im Allgemeinen vereinfachten und automatisierten Informationsgewinnung durch den Einsatz von Sensoren im Vergleich zur manuellen Informationsgewinnung kann der Einsatz von Sensoren im Speziellen ebenso zu einem durchgängigen Informationsfluss innerhalb logistischer Prozesse führen und somit Informationslücken bei baulegistischen Prozessen schließen und die Transparenz erhöhen. Hiermit in Verbindung stehen u. a. intelligente Bauprodukte, die mit Sensoren ausgestattet sind und Daten oder Informationen mitteilen. In der Vergangenheit wurden hierzu vor allem Sensorsysteme auf Basis der RFID-Technologie erforscht und entwickelt. Die RFID-Technologie stellt hierbei verallgemeinert ein automatisches und berührungsloses Identifizierungssystem dar. Aktive RFID-Tags mit eigener Energieversorgung erfordern im Vergleich zu bspw. Barcodes oder QR-Codes kein aktives Erfassen oder Scannen und damit eine Sichtbarkeit des Identifizierungselements. Passive RFID-Tags ohne interne Energieversorgung werden durch das elektromagnetische Feld zwischen RFID-Tag und RFID-Lesegerät mit Energie versorgt und müssen dementsprechend vom RFID-Lesegerät aktiviert werden. Passive RFID-Tags sind somit auf ein Signal des RFID-Lesegeräts angewiesen wo hingegen aktive RFID-Tags kontinuierlich eigenständig Signale senden. Auf die konkreten Entwicklungen im Zusammenhang mit der Baulegistik und der Nutzung der RFID-Technologie wurde bereits in Kapitel 2.4.3 beispielhaft verwiesen. An dieser Stelle sei auf die Herausforderungen der RFID-Technologie, wie bspw. die Signalabschirmung durch Flüssigkeiten oder metallische und dichte Materialien sowie die Möglichkeit der Pulkerfassung hingewiesen.^{528, 529, 530}

⁵²⁷ Vgl. Motzko et al. (2013): Grundlagen des Bauprozessmanagements, S. 19 f.

⁵²⁸ Vgl. Martin (2016): Transport- und Lagerlogistik, S. 530

⁵²⁹ Vgl. Franke/Dangelmaier (2006): RFID – Leitfaden für die Logistik, S. 72

⁵³⁰ Vgl. Helmus et al. (2009): RFID in der Baulegistik, S. 296

Mit der vorliegenden Arbeit soll u. a. die o. g. Informationslücke bei bauleistungsprozessen geschlossen werden. Hierzu wird eine systematische, digitale und automatische Verknüpfung und Vereinigung der Informations- und Güterflüsse in Echtzeit im Sinne des Supply-Chain-Managements für den Baustellenversorgungsprozess angestrebt. Darüber hinaus soll über einen ereignisbasierten Ansatz der Bauprozessidentifikation die Prozesssteuerung und -regelung unterstützt werden. Als Prozessindikatoren dienen bei der vorliegenden Arbeit die Position, die Bewegung sowie die Neigung und das Gewicht von Baustoffen und Bauteilen. Das zu entwickelnde Baustellenversorgungssystem basiert demnach im Hinblick auf die eingesetzten Sensoren auf Gewichtssensoren und Sensoren zur Neigungsmessung sowie auf BLE-Beacons zur Lokalisierung. Zur wissenschaftlichen Einordnung und als Ergänzung zu Kapitel 2.4.3 werden im Folgenden exemplarisch einige Entwicklungen in Bezug zu den beschriebenen Sensoren des Baustellenversorgungssystems vorgestellt. Hinsichtlich der Nutzung von Gewichtssensoren und Sensoren zur Neigungsmessung im Baubetrieb konnten keine relevanten wissenschaftlichen Publikationen recherchiert werden.

HUGHES et al.⁵³¹ entwickeln ein Sensorsystem zur Identifizierung und Überwachung von Baulärm sowie zur Schallortung unter der Verwendung von BLE. PARK et al.⁵³² untersuchen die Möglichkeiten der Lokalisierung der Arbeitskräfte über BLE in Kombination mit der Erkennung der Arbeitskräfte beim Eintreten in zuvor festgelegte Gefahrenbereiche. OLIVIERI et al.⁵³³ begründen den Bedarf an Systemen zur Lokalisierung von Arbeitskräften, Betriebsmitteln und Materialien in Echtzeit und entwickeln hierzu ein Konzept auf Basis von BLE-Beacons und entsprechenden Gateways. Das theoretische Konzept wird anschließend von ZHAO et al.^{534, 535} zunächst in Laborversuchen in Innenbereichen beprobt sowie abschließend auf Baustellen im Innenbereich und auf Lagerflächen im Außenbereich validiert. Bei den Labor- und Feldversuchen wurde der Fokus auf die Lokalisierung der Arbeitskräfte gelegt. Die BLE-Beacons waren hierbei durch die Befestigung an den Arbeitskräften mobil und die Gateways an immobilen Objekten befestigt. TEIZER et al.^{536, 537} nutzen die im Innenbereich über BLE-Beacons raumweise automatisch erfassten Umgebungs- und Positionsdaten zum einen zur Erfassung der Aufnahmeperson, die manuell den Baufortschritt aufnimmt sowie zum anderen zur Feststellung der Anwesenheit der Arbeitskräfte in ihrem Arbeitsbereich. STÖCKL⁵³⁸

⁵³¹ Hughes et al. (2015): Development of wireless sensor network using Bluetooth Low Energy (BLE) for construction noise monitoring

⁵³² Park et al. (2016): Framework of Automated Construction-Safety Monitoring Using Cloud-Enabled BIM and BLE Mobile Tracking Sensors

⁵³³ Olivieri et al. (2017): Real-Time Tracking of Production Control: Requirements and Solutions

⁵³⁴ Zhao et al. (2017): Data Analysis on Applying Real Time Tracking in Production Control of Construction

⁵³⁵ Zhao et al. (2019): Real-time resource tracking for analyzing value-adding time in construction

⁵³⁶ Teizer et al. (2017): Automatisierte 4D-Bauablaufvisualisierung und Ist-Datenerfassung zur Planung und Steuerung von Bauprozessen

⁵³⁷ Teizer et al. (2017): Internet of Things (IoT) for Integrating Environmental and Localization Data in Building Information Modeling (BIM)

⁵³⁸ Stöckl (2022): Einsatzpotenzial neuronaler Netze im Baubetrieb und in der Bauwirtschaft – Von der automatischen Datenerfassung bis hin zur Tätigkeitsklassifikation anhand erhobener Bewegungsmuster

entwickelt ein Konzept zur automatischen Lohnstundenerfassung mit gleichzeitiger Bereichs- und Tätigkeitszuordnung und erprobt dieses während den Stahlbetonarbeiten auf einer Baustelle. Die Dokumentation der Tätigkeiten erfolgt über Druckknöpfe auf einem Gadget. Die Bereichszuordnung basiert im Außenbereich auf einem globalen Navigationssatellitensystem und im Innenbereich auf BLE-Beacons. Im Kontext der Lokalisierung über BLE-Beacons und entsprechende Gateways sei auf die Untersuchung zu den unterschiedlichen Möglichkeiten der Lokalisierung von DROR et al.⁵³⁹ hingewiesen. Grundsätzlich ist zu unterscheiden, ob die BLE-Beacons mobil und die Gateways immobil sind oder entgegengesetzt. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass beide Möglichkeiten für die Lokalisierung auf Baustellen geeignet sind und ihre jeweiligen charakteristischen Vor- und Nachteile besitzen, die anwendungs- und projektbezogen abzuwägen sind. Neben der grundsätzlichen Variante sind auch die Anzahl und die Position der BLE-Beacons und Gateways anwendungs- und projektindividuell auszuwählen.

Die Lokalisierung über UWB und deren Baustelleneignung wurde von PFLUG⁵⁴⁰ und NORRDINE⁵⁴¹ im Rahmen der Entwicklung eines Bildinformationssystems auf Grundlage von georeferenzierten und orientierten Digitalfotos belegt.⁵⁴² Neben der Lokalisierung über BLE werden auch die Erkenntnisse zur Lokalisierung über UWB bei den aktuellen Forschungsaktivitäten des Instituts für Baubetrieb der TU Darmstadt genutzt und weiterentwickelt. Hierzu zählt u. a. ein sensorgestütztes Förderhilfsmittel als intelligente Palette, die neben der Erfassung von Umwelteinflüssen und Emissionsdaten, die Lokalisierung der Palette in einem Gebäude sowie die Ermittlung der Gewichtsbelastung ermöglicht. In einem ersten Entwicklungsschritt erfolgt eine raumweise Lokalisierung über BLE. In einem zweiten Entwicklungsschritt⁵⁴³ erfolgt die Lokalisierung und damit verbunden eine genauere Positionsbestimmung über UWB. Weiterführende Ausführungen zur intelligenten Palette sowie zu den weiteren Entwicklungen des Instituts für Baubetrieb der TU Darmstadt unter Mitwirkung des Verfassers dieser Arbeit sind bei MOTZKO et al.⁵⁴⁴ und WEIL⁵⁴⁵ sowie im nachfolgenden Kapitel zu finden.

⁵³⁹ Dror et al. (2019): Indoor Tracking of Construction Workers Using BLE: Mobile Beacons and Fixed Gateways vs. Fixed Beacons and Mobile Gateways

⁵⁴⁰ Pflug (2008): Ein Bildinformationssystem zur Unterstützung der Bauprozesssteuerung

⁵⁴¹ Norrdine (2008): Untersuchung und Entwicklung neuartiger Technologien für die präzise Positionierung und Orientierung innerhalb von Gebäuden

⁵⁴² Vgl. Motzko/Pflug (2009): Informationsgewinnung aus Bildern im Baubetrieb

⁵⁴³ Vgl. Norrdine/Motzko (2020): An internet of things based transportation cart for smart construction site

⁵⁴⁴ Motzko et al. (2021): Ausgewählte Aspekte des zeitnahen Controllings von Bauprojekten

⁵⁴⁵ Weil (2021): Ein Beitrag zur Anwendung der Lean Construction im schlüsselfertigen Hochbau

4 Systementwicklung und Systemevaluation

Das nachfolgende Kapitel beinhaltet die Systementwicklung und die Systemevaluation des Baustellenversorgungssystems. Die Notwendigkeit der durchgeführten Systementwicklung wird, weiterführend zu den bereits gewonnen Erkenntnissen aus den vorangegangenen Kapiteln, durch eine Situationsanalyse zum gegenwärtigen Baustellenversorgungsprozess und einer darauf aufbauenden Anforderungsanalyse belegt.

4.1 Situations- und Anforderungsanalyse

Im Verlauf dieses Unterkapitels wird der gegenwärtige Baustellenversorgungsprozess untersucht und analysiert. Die durchgeführte Situationsanalyse stellt dabei eine Bestätigung, Erweiterung und Detaillierung der bereits recherchierten Schwachstellen dar. Auf Basis eigener Untersuchungen und deren Forschungsergebnisse werden die recherchierten Schwachstellen darüber hinaus auf Aktualität überprüft. Die Situationsanalyse erfolgt hierbei entlang der Prozesskette Bestellung, Avisierung, Anlieferung und Lagerung. Abgeschlossen wird das Unterkapitel mit einer aus der Situationsanalyse abgeleiteten Anforderungsanalyse an den Baustellenversorgungsprozess.

4.1.1 Bestellprozess

Bei den Untersuchungen zum Bestellprozess sind drei Ausprägungen des Prozesses zu differenzieren. Es wird zum einen der unternehmensinterne Bestellprozess zwischen Baustelle und Bauhof sowie zum anderen der unternehmensübergreifende Bestellprozess zwischen Baustelle und Baustoffhandel untersucht. Der unternehmensübergreifende Bestellprozess wird darüber hinaus sowohl aus Sicht der Baustelle als auch aus Sicht des Baustoffhandels betrachtet. Der Fokus bei den Untersuchungen zum Bestellprozess liegt auf der operativen Durchführung der Bestellung und den sich daraus ergebenden Schwachstellen.

Durch Expertenbefragungen^{546, 547, 548} bei Bauunternehmungen mit einem eigenem Bauhof konnte eine Dominanz der Bestellung und der Kommunikation über Telefon und E-Mail festgestellt werden. Die Lieferscheine liegen in Papierform vor und werden teilweise händisch ausgefüllt. Eine digitale Bestandsführung respektive ein digitales Lagerverwaltungssystem auf dem Bauhof sind nicht immer vorzufinden und führen zu stellenweise ungenauen oder unbekanntem Beständen sowohl auf der Baustelle als auch auf dem Bauhof. Im Falle der Anwendung eines digitalen Lagerverwaltungssystems fehlt die Implementierung eines digitalen Bestellsystems. Der sich durch diese Aspekte ergebende hohe Aufwand der Disposition durch eingehende Telefonate oder Recherchen u. a. auf Grund der Unkenntnis über den Lagerbestand konnte durch eine Arbeitszeitstudie nach der REFA-Methodik⁵⁴⁹ auf einem Bauhof bestätigt werden. Die hohe Anzahl an eingehenden Telefonaten oder Recherchen steht im Zusammenhang zur Bestellannahme sowie zu Fragen zum Lagerbestand und zum Standort sowie zur Ankunftszeit des Lieferfahrzeugs. Darüber hinaus sind zeitaufwändige Rundgänge der Disposition über den Bauhof auf Grund von Unkenntnissen über die aktuellen

⁵⁴⁶ Vgl. Arndt (2020): Eine Analyse von Bauhöfen – Erstellung eines Konzeptes zur Organisation von Bauhöfen und deren Prozessstrukturen

⁵⁴⁷ Vgl. Fincke (2019): Eine Analyse zur Verwaltung von Großgeräten im Tief- und Straßenbau

⁵⁴⁸ Vgl. Keller (2018): Eine Analyse von Bauhöfen – Erstellung eines Zukunftskonzeptes

⁵⁴⁹ Vgl. Schwenzer (2019): Ermittlung von Verbesserungspotentialen in den Prozessen und in den Prozessstrukturen des Bauhofes einer Bauunternehmung

Lagerbestände festzustellen. Der aufgenommene prozentuale Anteil der Rundgänge bezieht sich auf die reinen Wegezeiten der Disposition. Die Gespräche mit den Mitarbeitenden des Bauhofs während der Rundgänge zur Klärung von Fragen oder Unklarheiten zum aktuellen Lagerbestand sind separat erfasst. Abbildung 29 visualisiert die prozentuale Verteilung der erfassten Tätigkeiten in der Disposition.

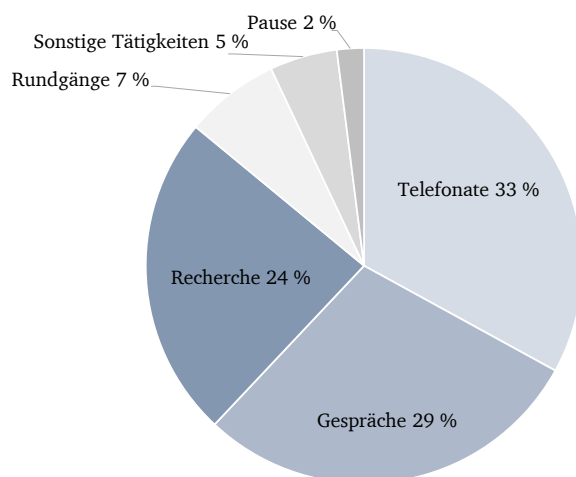


Abbildung 29: Prozentuale Verteilung der Tätigkeiten in der Disposition eines Bauhofs⁵⁵⁰

Durch die Auswertung von Fragebögen⁵⁵¹ konnte am Beispiel der Geräteverwaltung erkannt werden, dass bei einem manuellen, papierbasierten und somit fehleranfälligen Erfassungssystem die Zufriedenheit der Beteiligten mit der Geräteverwaltung geringer ist als im Vergleich zu digitalisierten Systemen. Dementsprechend zeigen Unternehmen mit digitalisierten Geräteverwaltungssystemen sowie automatisierten Identifikationssystemen eine höhere Zufriedenheit.

Experteninterviews bei Rohbau-⁵⁵² und Ausbauunternehmen⁵⁵³ zeigen, dass die Bestellungen seitens der Baustelle beim Baustoffhandel ebenso wie der unternehmensinterne Bestellprozess überwiegend durch eine Kommunikation über Telefon und E-Mail geprägt ist. Hinzu kommt bei kleineren Ausbauunternehmen die Bestellung beim Baustoffhandel vor Ort. Außerdem ist teilweise eine doppelte Bestellung festzustellen. Über die telefonische Bestellung wird bspw. die Verfügbarkeit des Materials vorab erfragt um nachfolgend die Bestellung per E-Mail zu dokumentieren. Des Weiteren kann die Bestellung der Baustelle beim Baustoffhandel als kurzfristig, meistens wird die Lieferung unmittelbar am Tag nach der Bestellung erwartet, und mit einer hohen Häufigkeit beschrieben werden.

⁵⁵⁰ In Anlehnung an Schwenzer (2019): Ermittlung von Verbesserungspotentialen in den Prozessen und in den Prozessstrukturen des Bauhofs einer Bauunternehmung, S. 61

⁵⁵¹ Vgl. Sorge (2018): Eine Untersuchung zu den Systemen der Geräteverwaltung auf Baustellen des Hochbaus

⁵⁵² Vgl. Ganeswaran (2019): Eine Untersuchung zum Bestellprozess von Baustoffen und Baugeräten in der Bauwirtschaft

⁵⁵³ Vgl. Caliskan (2021): Eine Analyse zu den Bestellprozessen von Baustoffen in der Bauwirtschaft aus Sicht der Baustelle

Die Untersuchungen des Bestellprozesses aus Sicht des Baustoffhandels in Form von Experteninterviews^{554, 555} sowie die Auswertungen von Fragebögen⁵⁵⁶ bestätigen und ergänzen die Analysen des Bestellprozesses aus Sicht der Baustelle. Prinzipiell ist die Bestellung beim Baustoffhandel über E-Mail, Telefon, Telefax, SMS, Messenger-Dienste, Online-Shop, per Post oder vor Ort möglich. Das konkrete Angebot an möglichen Bestellkanälen ist hierbei händlerspezifisch und eine Systematisierung der Ausprägungen der angebotenen Bestellkanäle ist nicht möglich. Seitens des Baustoffhandels werden als häufigste Bestellmethode, dem Bestellausgang der Baustelle folgend, das Telefon und die E-Mail genannt. Abbildung 30 zeigt die Auswertung der Fragebögen hinsichtlich der genannten Häufigkeiten der einzelnen Bestellmöglichkeiten.

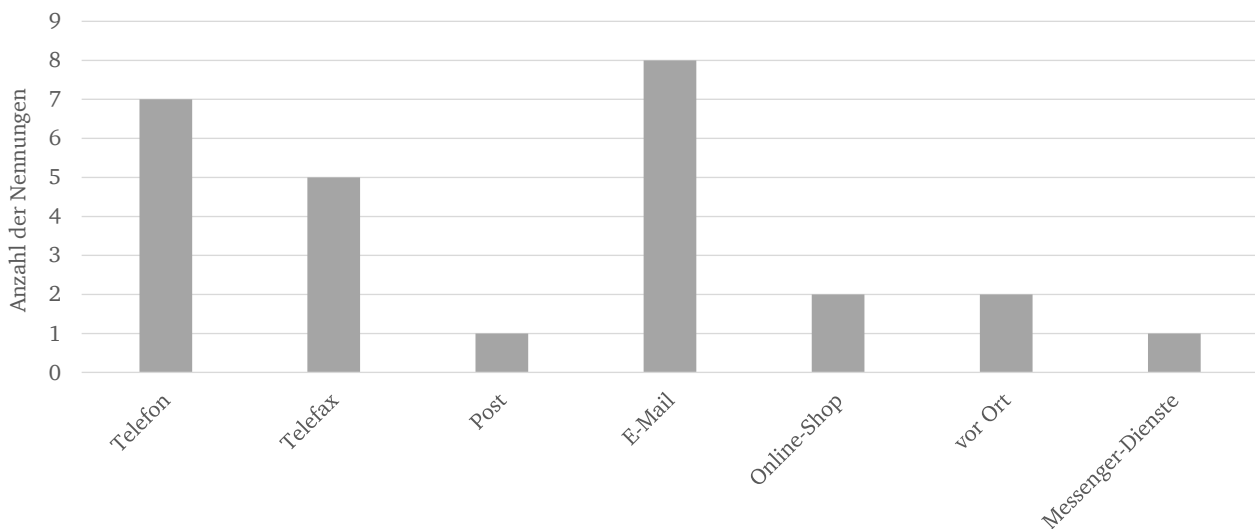


Abbildung 30: Häufigkeiten der einzelnen Bestellmöglichkeiten aus Sicht des Baustoffhandels⁵⁵⁷

Die kurzfristigen und kleinteiligen Bestellungen der Baustelle sind aus Sicht des Baustoffhandels auf eine geringe Arbeitsvorbereitung und Vorplanung der Materialbedarfe seitens der Baustelle zurückzuführen. Die kurzfristigen und teilweise wenig koordinierten Bestellungen führen beim Baustoffhandel zu einer hohen Anzahl an zu verarbeiteten Informationen. Der Baustoffhandel artikuliert zwar die Bestrebungen eines digitalisierten Informations- und Kommunikationsflusses zwischen Produzent, Handel und Baustelle, stellt aber ebenso fest, dass der Informations- und Kommunikationsfluss aktuell durch Medienbrüche geprägt ist. Ein wesentlicher Faktor ist in diesem Zusammenhang die Nutzung von Lieferscheinen in Papierform sowie die gezeigte häufige Bestellung über Telefon und E-Mail.

⁵⁵⁴ Vgl. Lang (2020): Eine Untersuchung zum Baustoffhandel

⁵⁵⁵ Vgl. Velagic (2022): Eine Analyse zu den Bestell- und Lieferprozessen von Baustoffen in der Bauwirtschaft aus Sicht des Baustoffhandels

⁵⁵⁶ Vgl. Zerhoubi (2020): Eine Untersuchung zum Bestell- und Lieferprozess von Baustoffen in der Bauwirtschaft aus Sicht des Baustoffhandels

⁵⁵⁷ In Anlehnung an Zerhoubi (2020): Eine Untersuchung zum Bestell- und Lieferprozess von Baustoffen in der Bauwirtschaft aus Sicht des Baustoffhandels, S. 65

Als häufiger Grund für die Bestellung per Telefon werden u. a. der persönliche Kontakt sowie die direkte Rückmeldung genannt. Dem gegenüber steht, dass eine telefonische Bestellung zu Missverständnissen führen kann und nicht dokumentiert ist. Außerdem werden durch die telefonischen Bestellungen vermeidbare, zusätzliche und fehleranfällige Prozesse initiiert. Als Beispiel kann hier das manuelle Erfassen und Einpflegen der Bestellung in unternehmensinterne Systeme genannt werden. Durch eine Bestellung per E-Mail wird diese zwar dokumentiert, hierbei kann es aber zu teilweise unvollständigen oder unklaren Bestellungen kommen, die Nachfragen zur Folge haben. Ebenso wie bei der Bestellung per Telefon ergeben sich auch bei der Bestellung per E-Mail vermeidbare und fehleranfällige Prozesse. Die Einordnung der Bestellung per Telefax, SMS und Messenger-Dienst oder per Post entspricht im Wesentlichen den Ausführungen zur Bestellung per E-Mail.

Zusammenfassend kann der Bestellprozess bei allen drei Ausprägungen als analog, wenig nachvollziehbar oder transparent sowie durch manuelle Tätigkeiten als fehleranfällig beschrieben werden. Digitale und automatisierte Bestell- und Bestandführungssysteme kommen in der gegenwärtigen Baupraxis nicht ganzheitlich und integriert zur Anwendung. Darüber hinaus zeigen die Untersuchungen, dass die bereits erkannten Schwachstellen^{558, 559, 560, 561} wie bspw. die häufigen Medienbrüche, die nicht dokumentierten oder papierbasierten Prozesse oder die Mehrfacherfassungen von Informationen im Kontext des Bestellprozesses auch in der gegenwärtigen Baupraxis nicht überwunden und somit weiterhin aktuell sind.

⁵⁵⁸ Vgl. Goldenberg (2005): Optimierung von Supply Chain Prozessen in der Bauwirtschaft durch mobile Technologien und Applikationen

⁵⁵⁹ Vgl. Klaubert (2011): Entwicklung eines RFID-basierten Informations- und Kommunikationssystems für die Baulogistik

⁵⁶⁰ Vgl. Meins-Becker (2011): Modell zur Unterstützung baulogistischer Prozesse entlang der Versorgungskette der Bauwirtschaft

⁵⁶¹ Vgl. Schmidt (2003): Wettbewerbsfaktor Baulogistik

4.1.2 Avisierungsprozess

Durch eine Avisierung der Transporte seitens der ausführenden Gewerke soll die Planung, Steuerung, Regelung, Kontrolle, Kommunikation und Dokumentation der Ver- und Entsorgungsprozesse der Baustelle vereinfacht und verbessert werden. Die Avisierung der Transporte erfolgt hierbei online über webbasierte Anwendungen im Vorhinein zum eigentlichen Transport und enthält je nach projektspezifischen Anforderungen verschiedene Informationen. Verallgemeinert enthält eine Avisierung folgende Angaben:

- Besteller, Empfänger und Lieferant oder Abholer des Transports,
- Zeitpunkt des Transports,
- Aufenthaltsdauer des Fahrzeugs auf der Baustelle,
- Fahrzeugart,
- transportiertes Material und dessen Menge,
- Ent- oder Beladestelle auf der Baustelle,
- Ent- oder Beladeart und die damit in Verbindung stehenden und benötigten Hilfsmittel.

Nach der Angabe dieser Informationen sowie der Auswahl freier Zeitfenster seitens des Avisierenden wird die Avisierung durch den auf der Baustelle für das Avisierungssystem Verantwortlichen geprüft und freigegeben.

Um die Nutzung und die Zuverlässigkeit von Avisierungssystemen zu bewerten, wurden Untersuchungen bei verschiedenen Bauprojekten durchgeführt. Bei den untersuchten Bauprojekten handelt es sich um eine Modernisierung einschließlich Umbau und Erweiterung eines Hochhauses im innerstädtischen Bereich einer Großstadt (Untersuchung 1⁵⁶² und 2⁵⁶³), um den Neubau eines Bürogebäudes in einer Kleinstadt (Untersuchung 3⁵⁶⁴) sowie um den Neubau eines Hochhauses im innerstädtischen Bereich einer Großstadt (Untersuchung 4⁵⁶⁵). Alle Bauprojekte befinden sich während den Untersuchungen in der Ausbauphase. Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse und numerischen Werte sind zwar als exemplarische Richtwerte zu verstehen, erlauben aber trotzdem Aussagen zur tendenziellen Nutzung und zur Zuverlässigkeit von Avisierungssystemen.

Tabelle 1 zeigt für die untersuchten Projekte zum einen die Avisierungsquote, definiert als das Verhältnis zwischen avisierten Transporten und tatsächlichen Transporten sowie zum

⁵⁶² Vgl. Heil (2019): Eine Untersuchung zu Avisierungsprogrammen für die Versorgungslogistik in der Bauwirtschaft

⁵⁶³ Vgl. Kaffenberger (2019): Eine Analyse zur Anlieferungsavisierung in der Bauwirtschaft

⁵⁶⁴ Vgl. Müller (2020): Eine Untersuchung zur Anlieferungsavisierung in der Bauwirtschaft

⁵⁶⁵ Vgl. Hellrung (2021): Eine Untersuchung zur Avisierung der Vorgänge der Versorgungslogistik in der Bauwirtschaft

anderen die Erscheinungsquote, definiert als das Verhältnis zwischen avisierten Transporten, die erschienen sind und insgesamt avisierten Transporten.

Tabelle 1: Avisierungs- und Erscheinungsquote⁵⁶⁶

	Bauprojekt 1	Bauprojekt 2	Bauprojekt 3	Bauprojekt 4
Avisierungsquote	53 %	50 %	27 %	26 %
Erscheinungsquote	89 %	76 %	83 %	69 %

Im Rahmen der Auswertungen wird die Avisierungsquote hinsichtlich dem Gewerk, das die Avisierung durchgeführt hat und nach dem Transportfahrzeug detaillierter untersucht. Hierbei ist zu erkennen, dass zwischen Avisierungsquote und zulässigem Gesamtgewicht der Transportfahrzeuge vermeintlich eine Abhängigkeit besteht. Größere und schwerere Fahrzeuge scheinen häufiger avisiert zu werden als kleinere, leichtere Fahrzeuge. Dies führt bei gewerkespezifischen Betrachtungen dazu, dass Gewerke, die hauptsächlich durch größere Fahrzeuge beliefert werden, häufig eine höhere Avisierungsquote aufweisen. Dem gegenüber sind aber ebenso einzelne Gewerke zu identifizieren, welche trotz der Belieferung über kleinere Fahrzeuge überdurchschnittlich hohe Avisierungsquoten aufzeigen. Daher sind die beschriebenen Korrelationen zwischen Avisierungsquote, Fahrzeugart und Gewerk kritisch zu hinterfragen und erfordern weitere Untersuchungen. Die unterschiedlichen Avisierungsquoten könnten bspw. vielmehr mit der gewerkespezifischen Arbeitsvorbereitung oder Vorplanung der Transporte und Materialbedarfe sowie mit der für die Avisierung verantwortlichen Person in Zusammenhang stehen und von dieser abhängig sein. Da diese Korrelationen für die vorliegende Arbeit von untergeordneter Relevanz sind, wurde auf eine vertiefte Analyse sowie darauf aufbauend eine tabellarische Übersicht hierzu verzichtet. An dieser Stelle ist anzumerken, dass die Entsorgungsprozesse der Baustelle nur in den seltensten Fällen avisiert werden. Dies wird seitens der Verantwortlichen für die Entsorgungsprozesse mit der spontanen Notwendigkeit eines Entsorgungsbedarfs und somit einer nicht möglichen Planung und Avisierung dieser Transporte vorab begründet.

Den Tabellen 2 bis 4 sowie den Abbildungen 31 bis 36 kann eine Analyse zu den Abweichungen hinsichtlich der avisierten und den tatsächlichen Ankunfts- und Abfahrtszeiten der Transportfahrzeuge sowie deren Aufenthaltsdauer auf der Baustelle entnommen werden. Bei der Analyse der Abweichungen wird nach Verfrühungen und Verspätungen größer respektive kleiner 30 Minuten differenziert. Diese Unterscheidung ist u. a. mit den auswählbaren Zeitpunkten innerhalb der untersuchten Avisierungsprogramme zu begründen. Die auswählbaren Zeitpunkte sind in Intervalle von 30 Minuten aufgeteilt und stellen somit, auch vor dem Hintergrund einer baubetrieblichen Beurteilung, einen angemessenen Toleranzbereich dar.

⁵⁶⁶ Eigene Darstellung

Tabelle 2: Analyse zu den Abweichungen zwischen der avisierten und tatsächlichen Ankunftszeit⁵⁶⁷

	Bauprojekt 1	Bauprojekt 2	Bauprojekt 3	Bauprojekt 4
Durchschnittliche Abweichung zur avisierten Ankunftszeit bei zu frühen Anlieferungen	1:00 h	0:35 h	1:20 h	0:50 h
Maximale Abweichung zur avisierten Ankunftszeit bei zu frühen Anlieferungen	2:00 h	0:40 h	3:10 h	4:20 h
Prozentualer Anteil der Anlieferungen mit einer Verfrüfung größer 30 Minuten im Vergleich zur avisierten Ankunftszeit	25 %	22 %	18 %	38 %
Durchschnittliche Abweichung zur avisierten Ankunftszeit bei zu späten Anlieferungen	1:00 h	1:15 h	1:30 h	0:20 h
Maximale Abweichung zur avisierten Ankunftszeit bei zu späten Anlieferungen	2:15 h	2:10 h	4:00 h	1:00 h
Prozentualer Anteil der Anlieferungen mit einer Verspätung größer 30 Minuten im Vergleich zur avisierten Ankunftszeit	56 %	56 %	45 %	12 %
Prozentualer Anteil der Anlieferungen mit einer Verfrüfung oder Verspätung kleiner 30 Minuten im Vergleich zur avisierten Ankunftszeit	19 %	22 %	37 %	50 %

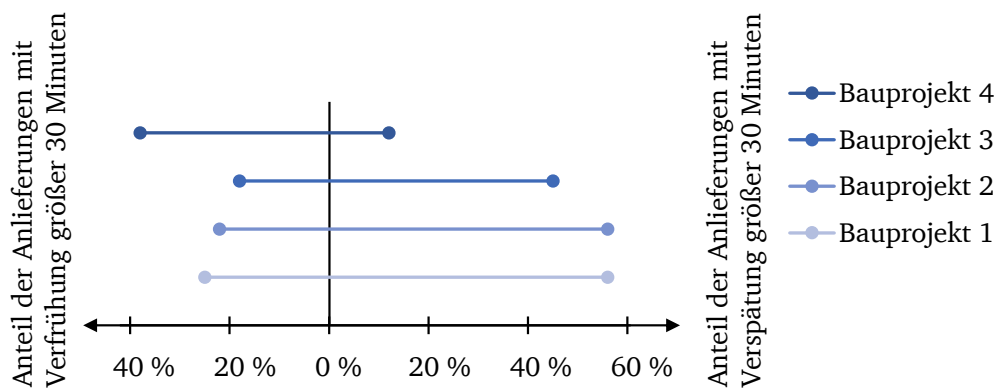
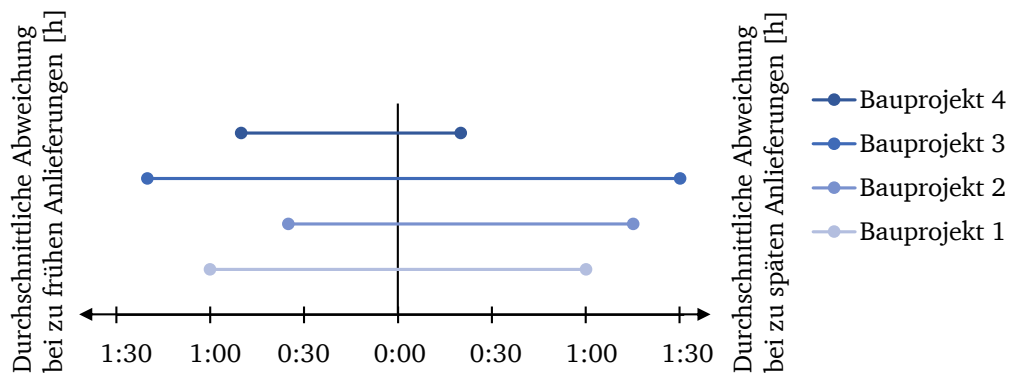
Abbildung 31: Prozentualer Anteil der verfrühten und verspäteten Anlieferungen⁵⁶⁸Abbildung 32: Durchschnittliche Abweichungen der verfrühten und verspäteten Anlieferungen⁵⁶⁹⁵⁶⁷ Eigene Darstellung⁵⁶⁸ Eigene Darstellung⁵⁶⁹ Eigene Darstellung

Tabelle 3: Analyse zu den Abweichungen zwischen der avisierten und tatsächlichen Abfahrtszeit⁵⁷⁰

	Bauprojekt 1	Bauprojekt 2	Bauprojekt 3	Bauprojekt 4
Durchschnittliche Abweichung zur avisierten Abfahrtszeit bei zu frühen Abfahrten	1:15 h	1:10 h	4:10 h	1:20 h
Maximale Abweichung zur avisierten Abfahrtszeit bei zu frühen Abfahrten	3:00 h	2:30 h	8:00 h	4:35 h
Prozentualer Anteil an Transporten, die die Baustelle im Vergleich zur avisierten Abfahrtszeit mehr als 30 Minuten zu früh verlassen	69 %	67 %	80 %	68 %
Durchschnittliche Abweichung zur avisierten Abfahrtszeit bei zu späten Abfahrten	1:10 h	0:40 h	0:55 h	0:40 h
Maximale Abweichung zur avisierten Abfahrtszeit bei zu späten Abfahrten	1:50 h	0:40 h	0:55 h	1:25 h
Prozentualer Anteil an Transporten, die die Baustelle im Vergleich zur avisierten Abfahrtszeit mehr als 30 Minuten zu spät verlassen	19 %	11 %	9 %	3 %
Prozentualer Anteil an Transporten, die die Baustelle im Vergleich zur avisierten Abfahrtszeit weniger als 30 Minuten zu spät oder zu früh verlassen	12 %	22 %	11 %	29 %

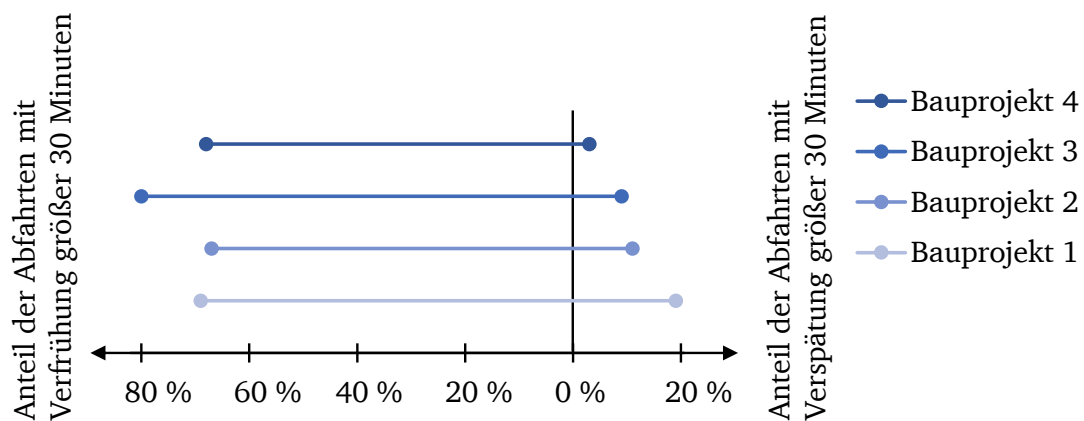


Abbildung 33: Prozentualer Anteil der verfrühten und verspäteten Abfahrten⁵⁷¹

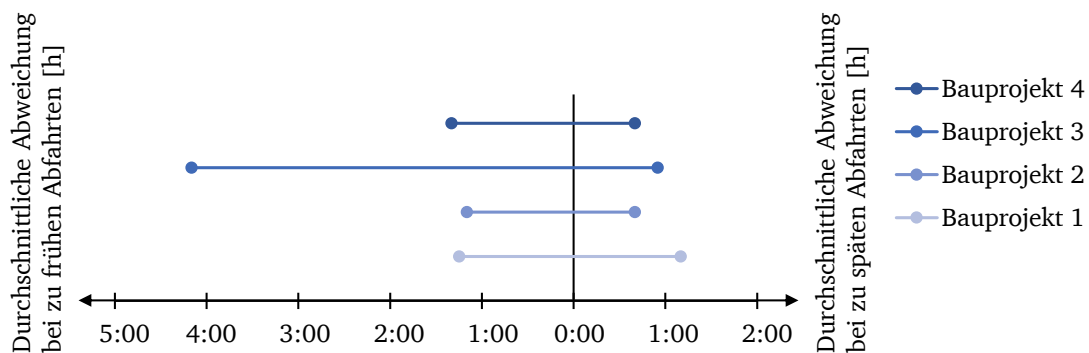


Abbildung 34: Durchschnittliche Abweichungen der verfrühten und verspäteten Abfahrten⁵⁷²

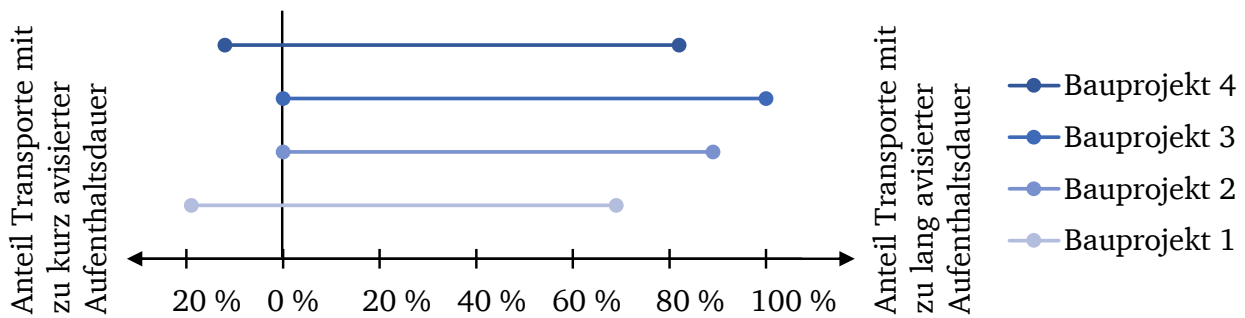
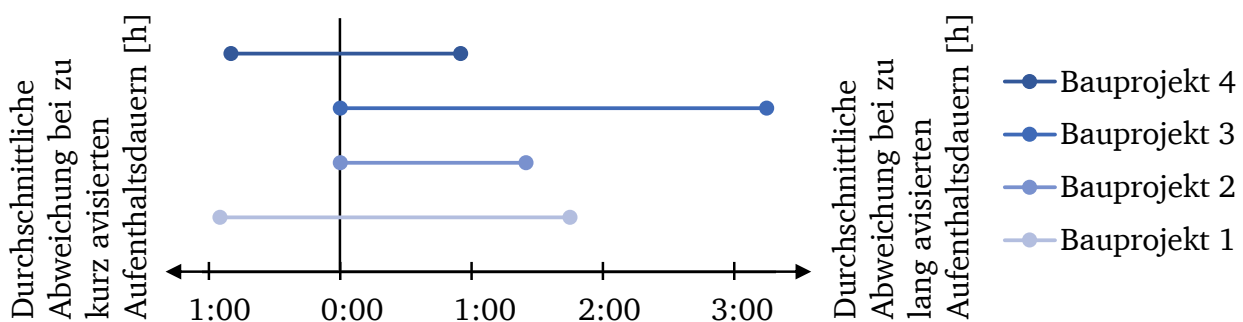
⁵⁷⁰ Eigene Darstellung

⁵⁷¹ Eigene Darstellung

⁵⁷² Eigene Darstellung

Tabelle 4: Analyse zu den Abweichungen zwischen der avisierten und tatsächlichen Aufenthaltsdauer⁵⁷³

	Bauprojekt 1	Bauprojekt 2	Bauprojekt 3	Bauprojekt 4
Durchschnittliche avisierte Aufenthaltsdauer	2:00 h	1:50 h	4:25 h	1:50 h
Durchschnittliche tatsächliche Aufenthaltsdauer	1:00 h	0:40 h	1:00 h	1:10 h
Prozentualer Anteil an Transporten, die die avisierte Aufenthaltsdauer überschreiten – Aufenthaltsdauer zu kurz avisiert	19 %	0 %	0 %	12 %
Durchschnittliche Abweichung bei zu kurz avisierten Aufenthaltsdauern	0:55 h	-	-	0:50 h
Maximale Abweichung bei zu kurz avisierten Aufenthaltsdauern	1:20 h	-	-	1:05 h
Prozentualer Anteil an Transporten, die die avisierte Aufenthaltsdauer unterschreiten – Aufenthaltsdauer zu lang avisiert	69 %	89 %	100 %	82 %
Durchschnittliche Abweichung bei zu lang avisierten Aufenthaltsdauern	1:45 h	1:25 h	3:15 h	0:55 h
Maximale Abweichung bei zu lang avisierten Aufenthaltsdauern	4:00 h	2:00 h	10:25 h	2:50 h
Prozentualer Anteil an Transporten, die die avisierte Aufenthaltsdauer einhalten	12 %	11 %	0 %	6 %

Abbildung 35: Prozentualer Anteil der zu kurz und zu lang avisierten Aufenthaltsdauern⁵⁷⁴Abbildung 36: Durchschnittliche Abweichungen der zu kurz und zu lang avisierten Aufenthaltsdauern⁵⁷⁵⁵⁷³ Eigene Darstellung⁵⁷⁴ Eigene Darstellung⁵⁷⁵ Eigene Darstellung

Die dargestellten Abweichungen bei den avisierten Ankunfts- und Abfahrtszeiten sowie bei den Aufenthaltsdauern zeigen, dass die vorab gewählten Zeitfenster größtenteils nicht eingehalten werden oder die Zeitfenster nicht sachgerecht gewählt sind. Die Analyse der weiteren Informationen einer Avisierung wie bspw. die Fahrzeugart, die Be- oder Entladeart und -stelle sowie die Materialmenge zeigen keine für die vorliegende Arbeit relevanten Abweichungen. Als Ergänzung wird an dieser Stelle auf bereits durchgeführte Untersuchungen⁵⁷⁶ des Instituts für Baubetrieb der TU Darmstadt im Kontext der Avisierungsprozesse in der Rohbauphase hingewiesen. Im Rahmen dieser Untersuchungen konnten bei einem Klinikneubau in einer Großstadt ebenfalls Abweichungen hinsichtlich der avisierten und tatsächlichen Ankunfts- und Abfahrtszeiten der Transportfahrzeuge festgestellt werden. Die durchschnittliche Abweichung beträgt bei der Ankunftszeit 1:55 h und bei der Abfahrtszeit 0:27 h.

Trotz der Bestrebungen, durch die Nutzung von Avisierungssystemen die Planung, Steuerung, Regelung, Kontrolle, Kommunikation und Dokumentation der Ver- und Entsorgungsprozesse der Baustelle zu vereinfachen und zu verbessern, zeigen sich auf Grund der dargestellten Abweichungen bei den avisierten Informationen sowie der nicht vollumfänglichen Nutzung der Avisierungssysteme und der somit unzureichenden Zuverlässigkeit weiterhin Schwachstellen in Bezug zur intendierten Wirkung. Abbildung 37 zeigt exemplarisch, dass auch bei der Nutzung von Avisierungssystemen durch geringe Avisierungsquoten oder infolge der Missachtung der gewählten Zeitfenster, unkoordinierte Ver- und Entsorgungsprozesse festzustellen sind, die wiederum zu einer Überlastung der Baustellenzufahrten führen und Auswirkungen auf die Projektraumumgebung zur Folge haben.

⁵⁷⁶ Vgl. Greve (2015): Analyse der zeitlichen Verteilung bauleistungsprozesse im Rohbau zur Unterstützung automatisierter Avisierungsprozesse, S. 61 f.



Bild 1: Die Baustellenzufahrt ist durch die gleichzeitige Anlieferung von drei nicht avisierten Transporten überlastet (siehe Lkw 1 bis 3). Die Entladung der Transporte erfolgt teilweise außerhalb des Projekttraums. Es sind Verkehrsbeeinträchtigungen in der Projekttraumumgebung zu konstatieren (siehe Pkw 1 und 2).



Bild 2: Die Entladezone ist durch Entsorgungscontainer und Material blockiert. Das Lieferfahrzeug kann zur Entladung nicht vollständig in den Projekttraum einfahren und verengt den öffentlichen Straßenraum. Im weiteren Verlauf sind Verkehrsbeeinträchtigungen in der Projekttraumumgebung zu konstatieren.



Bild 3: Ein avisierte Transport befindet sich innerhalb der Entladezone (siehe Lkw 2). Ein nicht avisierte Transport und die damit verbundenen Entsorgungsprozesse (siehe Lkw 3) führen zu Verkehrsbeeinträchtigungen in der Projekttraumumgebung. Diese potenzieren sich durch einen weiteren nicht avisierte Transport (siehe Lkw 1). Es sind Verkehrsbeeinträchtigungen in der Projekttraumumgebung (siehe Pkw 1) und im weiteren Verlauf eine Staubbildung zu konstatieren.

Abbildung 37: Überlastung der Baustellenzufahrten und Auswirkungen auf die Projekttraumumgebung⁵⁷⁷

⁵⁷⁷ Eigene Darstellung, Bildquelle: Erik Hellrung

4.1.3 Anlieferungsprozess

Die Erkenntnisse aus den Kapiteln 4.1.1 und 4.1.2 werden im Folgenden vor dem Hintergrund der JIT-Anlieferung in der Ausbauphase zusammengeführt und diskutiert. Als JIT-Anlieferung ist eine Anlieferung zu verstehen, bei der planmäßig keine Lagerhaltung der angelieferten Materialien vorgesehen ist. Das Material wird direkt zum Arbeitsplatz geliefert und unmittelbar verwendet. Dementsprechend können Lagertransporte und JIT-Transporte definiert werden.⁵⁷⁸ Die durchgeführten Untersuchungen zur Materiallagerung werden in Kapitel 4.1.4 vorgestellt. Grundvoraussetzungen für eine JIT-Anlieferung sind eine adäquate Arbeitsvorbereitung und im Zuge dessen eine präzise Takt- und Materialbedarfsplanung. Eine Weiterentwicklung der JIT-Anlieferung stellt die JIS-Anlieferung dar. Bei einer JIS-Anlieferung erfolgt die Anlieferung zusätzlich in Sequenzen entsprechend der Reihenfolge der Montage der Elemente oder des Einbaus der Materialien.

In der gegenwärtigen Baupraxis ist festzustellen, dass das eigene Logistikkonzept seitens der Verantwortlichen oftmals als JIT bezeichnet und verstanden respektive wahrgenommen wird. Bei einer genaueren Betrachtung ist aber zu konstatieren, dass diese Logistikkonzepte und Anlieferungsstrategien keine JIT-Anlieferungen darstellen. Neben den in Kapitel 4.1.4 dargestellten Materiallagerungen auf der Baustelle wird diese Aussage auch durch Erkenntnisse aus den Untersuchungen zum Baustoffhandel sowie zu den Avisierungssystemen gestützt.

JIT-Anlieferung erfordern seitens des Baustoffhandels Lieferungen in einem hohen Lieferrhythmus mit kleinteiligen Mengen. Diese Art der Lieferung wird durch Vertreter des Baustoffhandels in Experteninterviews^{579, 580} als Herausforderung artikuliert und führt zu einem erhöhten Dispositions- und Kommissionierungsaufwand beim Baustoffhandel. Des Weiteren entstehen bei JIT-Transporten durch die notwendige und sicherzustellende Materialverfügbarkeit höhere Lagerbestände beim Baustoffhandel im Vergleich zu Lagertransporten auf die Baustelle. Diese hohen Lagerbestände führen zu einer seitens des Baustoffhandels unerwünschten Kapitalbindung. Darüber hinaus würden JIT-Anlieferungen zu unausgelasteten Lieferfahrzeugen führen, da zur Sicherstellung des exakten Liefertermins innerhalb einer Auslieferungstour nicht mehr mehrere Baustellen hintereinander beliefert werden könnten. Die Aussagen der Experten des Baustoffhandels sowie die Aufnahmen der Füllgrade der Lieferfahrzeuge im Rahmen der Untersuchungen zu den Avisierungssystemen zeigen jedoch,

⁵⁷⁸ Vgl. Hofstadler (2009): Beschaffungslogistik für die Phase Bauwerk-Rohbau – Berechnung der Anzahl der Transporte für Stahlbetonarbeiten unter Anwendung der Monte-Carlo-Simulation, S. 148

⁵⁷⁹ Vgl. Lang (2020): Eine Untersuchung zum Baustoffhandel

⁵⁸⁰ Vgl. Velagic (2022): Eine Analyse zu den Bestell- und Lieferprozessen von Baustoffen in der Bauwirtschaft aus Sicht des Baustoffhandels

dass das Ziel seitens des Baustoffhandels eine möglichst maximale Auslastung der Lieferfahrzeuge respektive die maximale Anzahl beliefener Baustellen innerhalb einer Auslieferungstour ist. Es entsteht somit ein Zielkonflikt zwischen der Transportdisposition des Baustoffhandels und der Vorgabe des Lieferzeitpunkts seitens der Baustelle. Der Baustoffhandel bemängelt ferner eine seitens der Baustelle zu geringe Arbeitsvorbereitung und Vorplanung der Materialbedarfe, die eine zielführende JIT-Anlieferung deutlich erschwert respektive unmöglich macht. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass sich die eigenen Ergebnisse zum Baustoffhandel auch in anderen Untersuchungen zum Baustoffhandel⁵⁸¹ widerspiegeln.

Die Untersuchungen zu den Avisierungssystemen stützen die These einer unzureichenden Umsetzung von JIT-Anlieferungen. Das pünktliche Eintreffen der Lieferfahrzeuge innerhalb der vorgegebenen Zeitfenster ist eine essentielle Voraussetzung für die Realisierung von JIT-Anlieferungen. Die Ausführungen in Kapitel 4.1.2 belegen, dass diese Voraussetzung in der gegenwärtigen Baupraxis nicht zufriedenstellend erfüllt wird. Zusammenfassend ist daher festzuhalten, dass JIT-Anlieferung und somit auch JIS-Anlieferungen aktuell de facto die Ausnahme darstellen sowie auf Grund der artikulierten Herausforderungen des Baustoffhandels schwer umsetzbar und mit erhöhten Kosten verbunden sind. Anstelle von JIT-Transporten kommen derzeit, wie im folgenden Kapitel belegt wird, vermehrt Lagertransporte zum Einsatz.

⁵⁸¹ Vgl. Denzer/Haghsheno (2016): Der Baustoff-Fachhandel als Akteur in der baubetrieblichen Wertschöpfungskette – Ergebnisse einer Online-Befragung

4.1.4 Lagerungsprozess

Die Aussage, dass JIT-Transporte in der Ausbauphase die Ausnahme darstellen und somit Lagertransporte dominant sind, wurde bereits im vorherigen Kapitel herausgearbeitet und ist ebenso in der Literatur^{582, 583, 584} zu finden. Genauere Untersuchungen oder Belege zu diesem Aspekt über die reine Aussage hinaus, sind in der zitierten Literatur aber nicht zu finden. Es wird in diesem Kontext aber angemerkt, dass der Puffer- und Ausgleichsfunktion der Lagerung im Bauwesen eine zu hohe Bedeutung zugesprochen wird.⁵⁸⁵ Dies ist u. a. damit zu begründen, dass durch Materiallagerungen Störungen im Bauproduktionsprozess durch fehlendes Material zuvorgekommen werden soll respektive den Verantwortlichen die Abhängigkeit von JIT-Anlieferungen zu hoch oder das Vertrauen in eine zielführende Realisierung der JIT-Anlieferung zu gering ist. Um Aussagen und Bewertungen über die Bestandsreichweiten der gelagerten Materialien treffen zu können sowie die Dominanz der Lagertransporte belegen zu können, werden bei vier Bauprojekten Untersuchungen zur Lagerhaltung der Materialien durchgeführt.

Das untersuchte Bauprojekt 1⁵⁸⁶ ist eine Wohnbebauung in innerstädtischer Lage mit 38 Wohneinheiten verteilt auf zwei Häuser mit einer gemeinsamen Tiefgarage. Das Bauprojekt wird durch einen Generalunternehmer schlüsselfertig erstellt. Ein Logistikkonzept ist nicht vorhanden. Eine Abstimmung zu den Lagerflächen erfolgt über Absprachen zwischen dem Generalunternehmer und den Nachunternehmern.

Das untersuchte Bauprojekt 2⁵⁸⁷ ist eine Hotelbebauung in innerstädtischer Lage mit 180 Hotelzimmern und einer Tiefgarage. Das Bauprojekt wird durch einen Generalunternehmer schlüsselfertig erstellt. Ein Logistikkonzept ist nicht vorhanden. Eine Abstimmung zu den Lagerflächen erfolgt über Absprachen zwischen dem Generalunternehmer und den Nachunternehmern.

Das untersuchte Bauprojekt 3⁵⁸⁸ ist eine Wohnbebauung in innerstädtischer Lage mit 327 Wohneinheiten verteilt auf 23 Häuser mit einer gemeinsamen Tiefgarage. Darüber hinaus werden Gewerbe- und Büroflächen sowie eine Kindertagesstätte errichtet. Das Bauprojekt wird durch einen Generalunternehmer schlüsselfertig erstellt. Ein Logistikkonzept und ein

⁵⁸² Vgl. Goldenberg (2005): Optimierung von Supply Chain Prozessen in der Bauwirtschaft durch mobile Technologien und Applikationen, S. 149

⁵⁸³ Vgl. Günthner/Zimmermann (2008): Logistik in der Bauwirtschaft, S. 48

⁵⁸⁴ Vgl. Emken/Windbacher (2021): Baustoff-Handelskunde, S. 69

⁵⁸⁵ Vgl. Goldenberg (2005): Optimierung von Supply Chain Prozessen in der Bauwirtschaft durch mobile Technologien und Applikationen, S. 150

⁵⁸⁶ Vgl. Al Dandan (2019): Eine Untersuchung zur Lagerhaltung auf Baustellen von Baustoffen im Ausbau

⁵⁸⁷ Vgl. Hammel (2019): Eine Analyse zur Lagerhaltung auf Baustellen von Baustoffen im Ausbau

⁵⁸⁸ Vgl. Hackenberg (2020): Eine Analyse zur Lagerhaltung auf Baustellen von Baustoffen im Ausbau

Logistikhandbuch sind vorhanden und es gibt wöchentliche Logistikbesprechungen, bei denen u. a. die Abstimmung der Lagerflächen zwischen dem Generalunternehmer und allen Nachunternehmern erfolgt. Die Lagerdauern sollen möglichst gering gehalten werden.

Das untersuchte Bauprojekt 4⁵⁸⁹ ist eine Hotelbebauung in einem Gewerbegebiet mit 238 Hotelzimmern und einer Tiefgarage. Das Bauprojekt wird durch Einzelvergaben realisiert. Ein Logistikkonzept und ein Logistikhandbuch sind vorhanden und die Vergabe der Lagerflächen an die ausführenden Gewerke erfolgt durch einen Baulogistiker. Im Logistikhandbuch wird explizit das Ziel der JIT-Anlieferungen artikuliert.

Alle untersuchten Bauprojekte befinden sich während den Untersuchungen in der Ausbauphase. Im Zuge der Untersuchungen wurden Rundgänge über die Baustellen durchgeführt und u. a. Informationen zu den Lagerbeständen, -arten und -standorten sowie zu den Zuständen der gelagerten Materialien aufgenommen. Die während eines Rundgangs aufgenommenen Informationen zu einem einzelnen Lagerplatz werden im weiteren Verlauf als Beobachtung bezeichnet. Der Fokus der folgenden Ergebnisinterpretation der Baustellenaufnahmen liegt auf der Fragestellung, inwiefern JIT- oder Lagertransporte dominant sind, auf den Bestandsveränderungen innerhalb der Lagerplätze, um hierdurch Rückschlüsse respektive Tendenzen zur Lagerdauer und zu den Lagerbeständen ableiten zu können. Tabelle 5 gibt einen Überblick zu den aufgenommenen Daten, die Grundlage für die Ergebnisinterpretation sind. Bei Bauprojekt 3 wurde wegen der Größe des Bauprojekts eine Differenzierung zwischen Lagerplätzen im Innen- und Außenbereich vorgenommen.

Tabelle 5: Analyse des Lagerungsprozesses⁵⁹⁰

	Bauprojekt 1	Bauprojekt 2	Bauprojekt 3 – Innenbereich	Bauprojekt 3 – Außenbereich	Bauprojekt 4
Aufnahmedauer	5 Arbeitstage	5 Arbeitstage	10 Arbeitstage	10 Arbeitstage	10 Arbeitstage
Anzahl der Rundgänge	1 Rundgang pro Stunde	1 Rundgang pro Stunde	1 Rundgang pro Tag	2 Rundgänge pro Tag	3 Rundgänge pro Tag
Anzahl der aufgenommenen Lagerplätze	54	80	162	161	134
Anzahl der Beobachtungen	1811	1903	896	1574	2813
Anzahl der Bestandsveränderungen	147	138	346	382	441
Anteil der Beobachtungen mit einer Bestandsveränderung	8 %	7 %	39 %	24 %	16 %
Anzahl der Bestandsveränderungen – Zunahme	31	32	147	144	108
Anteil der Zunahmen bei einer Bestandsveränderung	21 %	23 %	42 %	38 %	24 %
Anzahl der Bestandsveränderungen – Abnahme	116	106	199	238	333
Anteil der Abnahmen bei einer Bestandsveränderung	79 %	77 %	58 %	62 %	76 %
Anzahl der Lagerplätze ohne Bestandsveränderung	18	29	26	12	33
Anteil der Lagerplätze ohne Bestandsveränderung	33 %	36 %	16 %	7 %	25 %
Durchschnittliche Anzahl der Bestandsveränderungen bei einem Lagerplatz während der Baustellenaufnahme	2,7	1,7	2,1	2,4	3,3
Durchschnittliche Anzahl einer Bestandsveränderung bei einem Lagerplatz pro Arbeitstag	0,54	0,35	0,21	0,24	0,33
Durchschnittliche Dauer bis zu einer Bestandsveränderung bei einem Lagerplatz	1,8 Arbeitstage	2,9 Arbeitstage	4,7 Arbeitstage	4,8 Arbeitstage	3,0 Arbeitstage

⁵⁸⁹ Vgl. Popal (2021): Eine Untersuchung zur Lagerhaltung von Baustoffen auf Baustellen in der Ausbauphase

⁵⁹⁰ Eigene Darstellung

Auf Grund der unterschiedlichen Größe der Bauprojekte variierte die Anzahl der Rundgänge. Hierdurch sind die Anzahl der Beobachtungen und die Anzahl der Bestandsveränderungen zwischen zwei Rundgängen nicht projektübergreifend miteinander vergleichbar. Bei mehreren Rundgängen und somit mehreren Beobachtungen zu den einzelnen Lagerplätzen wird eine Bestandsveränderung bei einem Lagerplatz in Relation seltener registriert als bei einer geringeren Anzahl an Rundgängen und Beobachtungen. Andererseits wurde versucht, die Aufnahmen so feingliedrig als möglich durchzuführen, um potenzielle JIT-Transporte sowie kurze Lagerdauern erkennen und aufnehmen zu können. Das Verhältnis zwischen Bestandszunahmen und Bestandsabnahmen zeigt, dass das Material in größeren Mengen angeliefert respektive gelagert wurde als es verbaut wurde, was ein Indiz dafür ist, dass keine auf die Produktionsprozesse abgestimmte Baustellenversorgung stattgefunden hat.

Es können bei allen Bauprojekten Lagerplätze festgestellt werden, bei denen während der kompletten Aufnahmedauer keine Bestandsveränderungen zu konstatieren waren. Des Weiteren zeigen die Aufnahmen, dass eine geringe Anzahl an Bestandsveränderungen einer großen Anzahl an Lagerplätzen zuzuordnen ist. Dies führt dazu, dass die durchschnittliche Anzahl an Bestandsveränderungen pro Lagerplatz, bezogen auf die gesamte Aufnahmedauer und dementsprechend auch pro Tag, relativ gering ist. Der reziproke Wert der durchschnittlichen Bestandsveränderungen pro Tag verdeutlicht, dass im Durchschnitt ca. alle 2 bis 5 Tage eine Bestandsveränderung bei einem Lagerplatz festzustellen ist.

Die Ermittlung von konkreten Lagerdauern erweist sich als problematisch. Zum einen ist bei einer Vielzahl der Lagerplätze der Lagerungsbeginn nicht bekannt, da der Lagerbestand bereits zu Beginn der Baustellenaufnahme vorhanden war. Zum anderen ist zusätzlich bei einer Vielzahl der Lagerplätze auch das Lagerungsende nicht bekannt, da am Ende der Baustellenaufnahme weiterhin ein Lagerbestand vorzufinden war. Die Auswertung der wenigen Daten, bei denen sowohl Lagerungsbeginn als auch -ende bekannt ist, zeigt eine durchschnittliche Lagerdauer von ca. 3 Arbeitstagen. Unter der Annahme, dass bei unbekanntem Lagerungsbeginn und -ende jeweils der Aufnahmebeginn und das Aufnahmeende dem Lagerungsbeginn und -ende entsprechen, ergeben sich durchschnittliche Lagerdauern von ca. 5 Arbeitstagen. Dieser Wert stellt jedoch einen stark vereinfachten Minimalwert der Lagerdauer dar. Durch gewerkespezifische Untersuchungen u. a. zu den Lagerdauern und -beständen konnten keine gewerkespezifischen Besonderheiten oder eine gewerkeweise Systematik im Hinblick auf diese Aspekte erkannt werden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass Anlieferungen größtenteils als Lagertransporte durchgeführt werden. Das Material wird für mehrere Bauabschnitte oder Taktbereiche bestellt und angeliefert. Als Grund hierfür wird von mehreren Projektverantwortlichen die Reduzierung der Transportkosten durch die Bestellung vollausgelasteter Lieferfahrzeuge genannt. Nach der Anlieferung erfolgt entweder eine dezentrale Lagerung nahe des Arbeitsplatzes oder eine zentrale Lagerung innerhalb des Baufeldes oder des Gebäudes. Durch eine

frühzeitige dezentrale Lagerung nahe des Arbeitsplatzes oder innerhalb des Taktbereichs wurden teilweise Umlagerungen notwendig, um einer Behinderung der vorgelagerten Gewerke entgegenzuwirken. Die wenigen JIT-Transporte konnten größtenteils bei hochwertigen Produkten wie bspw. Sanitärobjekten festgestellt werden. Dies wird seitens der Projektverantwortlichen mit der Reduzierung der Diebstahl- und Beschädigungsgefahr begründet. Experteninterviews⁵⁹¹ im Kontext des Fassadenbaus unterstützen die Aussagen zur Lagerhaltung auf Baustellen. Bezogen auf das Gewerk Fassade wird eine durchschnittliche Lagerdauer auf der Baustelle zwischen einer und zwei Wochen angegeben. Diese Lagerdauern seien zu verkürzen, um Lagerflächen zu entlasten sowie Beschädigungen und Verluste zu reduzieren. Auch KAISER⁵⁹² publiziert Bestandsreichweiten bei zwischengelagerten Baustoffen und Bauelementen von durchschnittlich 20 Arbeitstagen. Durch die dargelegten Untersuchungen kann gezeigt werden, dass Lagertransporte dominant sind und JIT-Transporte nur in seltenen Fällen umgesetzt werden. Darüber hinaus kann erkannt und bestätigt werden, dass die vorhandenen Lagerplätze eine Ausgleichs- und Pufferfunktion besitzen und diese Funktionen dementsprechend als wesentlich bewertet werden.

⁵⁹¹ Vgl. Rosenberger (2019): Eine Untersuchung zu Einflussfaktoren auf die Montageleistung beim Fassadenbau, S. 60

⁵⁹² Vgl. Kaiser (2013): Lean Process Management in der operativen Bauausführung, S. 56

4.1.5 Anforderungsanalyse

Der übergeordnete Rahmen für die im Folgenden dargestellte Anforderungsanalyse ist die Prämisse des Prozessdenkens und damit verbunden die Notwendigkeit eines Bauprozessmanagements in Echtzeit. Das Erfordernis eines Bauprozessmanagements in Echtzeit, unterstützt durch polysensorale Systeme, wurde von MOTZKO et al.⁵⁹³ begründet und belegt sowie u. a. von BINDER⁵⁹⁴, MEHR⁵⁹⁵ und WEIL⁵⁹⁶ zur Anwendung gebracht. Auf diese Autorenschaft wird an dieser Stelle hinsichtlich der Herleitung zur Notwendigkeit eines polysensoralen Bauprozessmanagements in Echtzeit sowie einer automatisierten Bauprozessidentifikation verwiesen. Vor diesem Hintergrund werden nachfolgend Anforderungen an die Baulogistik und im Speziellen an den Versorgungsprozess der Baustelle sowie an das zu entwickelnde Baustellenversorgungssystem definiert. Diese Anforderungen werden zum einen anhand der Analyse der theoretischen Grundlagen dieser Arbeit sowie zum anderen durch die eigenen Forschungsergebnisse hergeleitet.

Die Koordination und Organisation der baulogistischen Subsysteme sowie der einzelnen Gewerke mit ihren individuellen baulogistischen Prozessen sollte durch ein zentral gesteuertes baulogistisches Gesamtsystem erfolgen. Das Baustellenversorgungssystem ist daher gewerke- und subsystemübergreifend zu gestalten. Neben dem gewerke- und subsystemübergreifenden Ansatz sind die Prozesse der Produzenten und Zulieferer in das Baustellenversorgungssystem zu integrieren. Die vorgelagerten Produktions- und Logistikprozesse sowie die Bauproduktions- und Baulogistikprozesse sind unternehmensübergreifend zu berücksichtigen und zu synchronisieren. Es sind unternehmensübergreifende, flussorientierte Prozess- und Wertschöpfungsketten zu realisieren. Das Baustellenversorgungssystem ist in seiner institutionellen Abgrenzung daher als ein mesologistisches System auszubilden. Eine scharfe funktionelle Abgrenzung des Baustellenversorgungssystems würde den subsystemübergreifenden Ansatz konterkarieren. Es ist aber anzumerken, dass bei dem System zwar die Versorgungsprozesse im Fokus stehen, das System aber zugleich die Schnittstellen zur Produktionslogistik auf der Baustelle betrachtet und dieses baulogistische Subsystem ebenso, wie auch die Entsorgungs- und Informationslogistik, beeinflusst und darauf einwirkt.

Das mesologistische Baustellenversorgungssystem im Sinne eines Supply-Chain-Managements und im Speziellen die o. g. Synchronisation der vorgelagerten Produktions-, Logistik-, Bauproduktions- und Baulogistikprozesse erfordern im Hinblick auf die Organisation, Koordination sowie Steuerung einen durchgängigen, automatisierten, systematisierten und digi-

⁵⁹³ Motzko et al. (2013): Grundlagen des Bauprozessmanagements

⁵⁹⁴ Binder (2014): Ereignisbasierte Steuerung baulogistischer Prozesse mit Echtzeit-Ortungssystemen

⁵⁹⁵ Mehr (2012): Polysensorale Bauprozessidentifikation durch kognitive Systeme

⁵⁹⁶ Weil (2021): Ein Beitrag zur Anwendung der Lean Construction im schlüsselfertigen Hochbau

talisierten Informationsfluss und -austausch sowie eine verbesserte Kommunikation aller Prozessbeteiligten. Hierzu sind moderne Informations- und Kommunikationssysteme zur Anwendung zu bringen, die die digitale Vernetzung der einzelnen Akteure der Bauwirtschaft untereinander sowie mit den Lieferanten und den damit einhergehenden Lieferantenbeziehungen ermöglichen und vorantreiben. Es ist eine digitale Verknüpfung zwischen den Prozessen der Bestellung, der Ausführung und der Buchhaltung anzustreben sowie ein digitaler, transparenter und standardisierter Bestellprozess über bspw. ein, mit entsprechenden Attributen versehenes, digitales Gebäudemodell zu verwirklichen. Dies erfordert neben einer digitalen Darstellung und Benutzeroberfläche des Baustellenversorgungssystems u. a. die Einführung von Lagerverwaltungs- und Warenwirtschaftssystemen bei allen Prozessbeteiligten sowie einen Informationsaustausch dieser Systeme über definierte Schnittstellen. Durch die Anwendung moderner Informations- und Kommunikationssysteme innerhalb des Baustellenversorgungssystems sollen die derzeit vorhandenen Koordinations-, Medien- sowie Informationsbrüche und -verluste verringert respektive bestenfalls eliminiert werden.

Durch das Baustellenversorgungssystem sind die Genauigkeit der Transportavisierung und der Wissensstand über den Status quo der Transporte und Bestellungen zu erhöhen sowie eine zentrale Anlieferungsorganisation zu integrieren. Die vorhandenen Lagertransporte sind durch zuverlässige JIT-Transporte, die für eine Synchronisation von Bauproduktions- und Versorgungstakt sorgen, zu ersetzen. Die JIT-Transporte sollten taktgenaue Mengen in Form von vorkommissionierten Versorgungspaketen enthalten und unmittelbar zum Arbeitsplatz erfolgen. Damit in Verbindung steht die Anforderung durch das Baustellenversorgungssystem, Verschwendungen in den baulegistischen Prozessen, wie bspw. Wartezeiten, Lagerbestände auf der Baustelle, Transporte zur und auf der Baustelle sowie Suchzeiten zu reduzieren. Darüber hinaus sind die o. g. Versorgungspakete eindeutig zu kennzeichnen, mit allen relevanten Informationen für den Versorgungsprozess sowie mit Sensoren zu versehen um im Zuge dessen eine Identifikation und Lokalisierung der Versorgungspakete in Echtzeit, verbunden mit einer Überwachung und einer Digitalisierung des Materialflusses, zu realisieren. Des Weiteren sind die logistischen Prozesse zu standardisieren und zu zentralisieren sowie personell von den handwerklichen Ausführungsprozessen der einzelnen Gewerke zu trennen.

Eine weitere Anforderung an das Baustellenversorgungssystem ist neben der verbesserten Kommunikation zwischen den Projekt- und Prozessbeteiligten auch eine verbesserte Kommunikation mit der Projektraumumgebung. Des Weiteren sind durch das Baustellenversorgungssystem die Auswirkungen, Beeinträchtigungen und Behinderungen auf die Projektraumumgebung, resultierend aus dem Bauproduktionsprozess, zu reduzieren. Hierzu zählen neben der Vermeidung von Verkehrsbeeinträchtigungen und -behinderungen durch die Ver- und Entsorgungsprozesse der Baustelle auch die Reduzierung der Transport- und somit der Fahrzeuganzahl und Fahrstrecke zur Baustelle sowie die Erhöhung der Fahrzeugauslastung. Diese

Ziele des Baustellenversorgungssystems sorgen für eine Reduzierung des baustellenbezogenen innerstädtischen Verkehrsaufkommens und somit für eine Reduzierung des Emissionsausstoßes. Das Baustellenversorgungssystem gestaltet dadurch die Baulogistik und damit den Bauproduktionsprozess nachhaltiger.

Auf Basis der vorgestellten Anforderungen an das Baustellenversorgungssystem wird im folgenden Kapitel die Systementwicklung und die Systemevaluation dargestellt. Vor dem Hintergrund des o. g. polysensoralen Bauprozessmanagements wird zur Echtzeitsteuerung des Baustellenversorgungssystems ein ereignisbasierter Ansatz gewählt. Die zu diesem Zwecke benötigten Prozessindikatoren innerhalb des Baustellenversorgungssystems werden im Rahmen der Systementwicklung definiert.

4.2 Baustellenversorgungssystem

Im nachfolgenden Unterkapitel werden die Systementwicklung und die Systemevaluation des Baustellenversorgungssystems dargelegt. Hierzu wird zunächst eine Systembeschreibung durchgeführt, um im Zuge dessen neben der nötigen Integration eines Warenverteilzentrums in das Baustellenversorgungssystem auch die Notwendigkeit eines polysensoralen Systems innerhalb des Baustellenversorgungssystems zu verdeutlichen. Die bereits innerhalb der Systembeschreibung aufgezeigten Anforderungen an das polysensorale System werden anschließend nach funktionalen und technischen Systemanforderungen gegliedert und konkretisiert. Aufbauend auf den definierten Systemanforderungen werden der Systemaufbau sowie der Systemablauf entwickelt und dargestellt. Abschließend erfolgt die prototypische Umsetzung und Evaluation des entwickelten Systems durch definierte Anwendungsfälle in Form von Labor- und Feldversuchen.

4.2.1 Systembeschreibung

Die Darlegung der Systemanforderungen in technischer und funktionaler Hinsicht sowie die weiteren Aspekte der Systementwicklung erfordern zunächst eine Beschreibung der Grundstrukturen des Baustellenversorgungssystems. Als Basis für diese Beschreibung dienen die Ausführungen zu Warenverteilzentren in der Bauwirtschaft in Kapitel 3.2.2 sowie die Anforderungsanalyse an das Baustellenversorgungssystem in Kapitel 4.1.5.

Das Baustellenversorgungssystem entspricht in seinen Grundstrukturen einem Warenverteilzentrum. Um die Grundstrukturen des Baustellenversorgungssystems zielführend zu veranschaulichen steht hierbei ein externes und reales Warenverteilzentrum, das von einer Baustelle genutzt wird im Fokus. Der Ansatz des externen und realen Warenverteilzentrums ist durch Elemente und Strukturen zu ergänzen, die die Versorgung der Baustelle mit Materialien und weiteren Input-Faktoren der Arbeitssysteme beachten, die für den Ansatz des realen Warenverteilzentrums ungeeignet sind.

Neben den in Kapitel 3.2.2 erläuterten verschiedenen Möglichkeiten eines internen und realen Warenverteilzentrums sei an dieser Stelle auch die Möglichkeit eines virtuellen Warenverteilzentrums genannt. Im virtuellen Warenverteilzentrum werden bspw. Anforderungen, Bedarfe und Informationen zu den zu liefernden bauleistungsgegenständen und den damit verbundenen Baustellenversorgungsprozessen definiert und dargestellt. Das virtuelle Warenverteilzentrum kann hierdurch als digitaler Marktplatz fungieren und führt die Nachfrage der Baustelle mit dem Angebot des Baustoffhandels oder -produzenten zusammen. Das virtuelle Warenverteilzentrum benötigt somit keine zusätzliche physische Infrastruktur. Diese fehlende physische Infrastruktur führt aber dazu, dass u. a. die Konsolidierung von Lieferungen unterschiedlicher Lieferanten und dementsprechend eine zentralisierte Ausführung der Baustellenversorgungsprozesse erschwert bis unmöglich ist. Da diese Zentralisierung und die

damit in Verbindung stehenden positiven Effekte bei der vorliegenden Arbeit im Fokus stehen, findet im weiteren Verlauf eine Analyse zu einem realen Warenverteilzentrum und den realen Baustellenversorgungsprozessen statt.

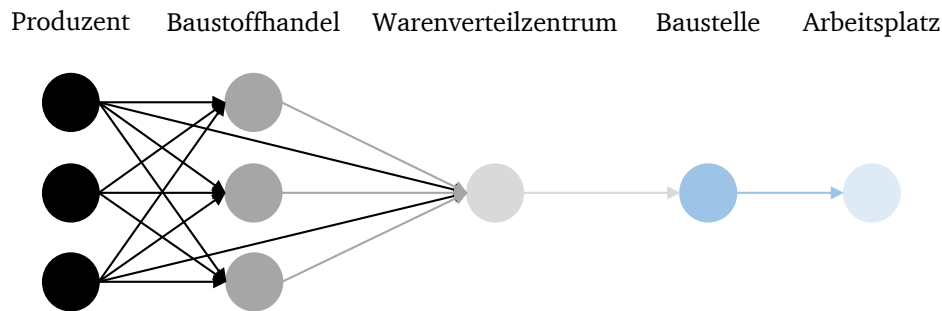


Abbildung 38: Logistiknetzwerk einer Baustelle mit Warenverteilzentrum⁵⁹⁷

Das Warenverteilzentrum fungiert, wie in Abbildung 38 dargestellt, als zusätzlicher Knoten im baulogistischen Netzwerk. Dieser dient hauptsächlich als Konsolidierungspunkt für die verschiedenen Materialien der unterschiedlichen Gewerke und Baustoffhändler respektive Produzenten sowie als Fläche zur projektspezifischen Materialkommissionierung. Durch die Einbindung eines Warenverteilzentrums entsteht eine zentrale Instanz zur Ausführung, Steuerung und Regelung sowie zur Koordination und Organisation der Baustellenversorgung. Die vorhandenen vertraglichen Beziehungen zwischen den ausführenden Gewerken und den jeweiligen Lieferanten bleiben hiervon zunächst unberührt und somit weiter bestehen.

Durch die Anlieferung der Materialien an das Warenverteilzentrum entstehen die durch den baustellenbezogenen Verkehr verursachten Auswirkungen nicht mehr in unmittelbarer Nähe der Projektraumumgebung, sondern wenn überhaupt, am verkehrsgünstig gelegenen Standort des Warenverteilzentrums. Auf Grund der anzustrebenden verkehrsgünstigen Lage des Warenverteilzentrums sowie einer entsprechend vorhandenen Infrastruktur innerhalb des Warenverteilzentrums sind die Auswirkungen des baustellenbezogenen Verkehrs bei einer Anlieferung zu diesem nicht mit den Auswirkungen bei einer Anlieferung direkt zur Baustelle zu vergleichen. Darüber hinaus vereinfacht sich durch die bereits o. g. Infrastruktur und Lage des Warenverteilzentrums ebenso die Organisation, Koordination sowie Steuerung der Anlieferungen der verschiedenen Lieferanten zum Warenverteilzentrum im Vergleich zum direkten Versorgungsprozess zur Baustelle.

Die direkte Versorgung der Baustelle erfolgt durch einen Routenverkehr zwischen der Baustelle und dem Warenverteilzentrum. Der operative Baustellenversorgungsprozess erfolgt somit durch einen standardisierten Anlieferungsprozess sowie eine zentrale Instanz. Der Routenverkehr ersetzt somit die Durchführung, Organisation, Koordination sowie Steuerung der

⁵⁹⁷ Eigene Darstellung

zahlreichen direkten Baustellenversorgungsprozesse der einzelnen gewerkespezifischen Lieferanten, mit denen die Baulogistikverantwortlichen darüber hinaus keine vertraglichen Beziehungen und somit keine direkte Weisungsbefugnisse haben.

Die projektspezifische Materialkommissionierung innerhalb des Warenverteilzentrums unterstützt und ermöglicht die geforderten JIT-Transporte. Die produktionssynchrone Baustellenversorgung erfolgt für mehrere Gewerke abgestimmt mittels dem o. g. Routenverkehr zwischen Baustelle und Warenverteilzentrum. Der bereits beschriebene zentralisierte und standardisierte Anlieferungsprozess führt zu einer zielsichereren Realisierung der JIT-Transporte im Vergleich zur Baustellenversorgung ohne ein Warenverteilzentrum. Neben den bereits genannten Vorteilen eines Routenverkehrs kann dieser durch den Einsatz von umweltfreundlichen Elektrofahrzeugen einen positiven Einfluss auf die Nachhaltigkeit der Baulogistik ausüben.

Die Beschreibungen des Warenverteilzentrums, welches ein zentraler Bestandteil des Baustellenversorgungssystems ist, zeigen bereits, dass einige der in Kapitel 4.1.5 definierten Anforderungen erfüllt werden können. Diese Anforderungen sind:

- ein zentral gesteuertes, unternehmensübergreifendes und mit dem Bauproduktionsprozess synchronisiertes baulogistische Gesamtsystem,
- eine zentrale Organisation und Koordination sowie Durchführung der Baustellenversorgungsprozesse,
- eine zuverlässige Realisierung von JIT-Transporten und damit verbunden eine Verschwendungsreduzierung auf der Baustelle,
- eine Standardisierung und Zentralisierung der baulogistischen Prozesse sowie eine personelle Trennung dieser Prozesse von den handwerklichen Ausführungsprozessen,
- eine Reduzierung der negativen Auswirkungen der baulogistischen Prozesse auf die Projektraumumgebung,
- eine nachhaltigere Gestaltung der Baulogistik durch das Baustellenversorgungssystem.

Die weiteren Anforderungen sowie das übergeordnete Ziel eines Bauprozessmanagements in Echtzeit erfordern, neben der Einbindung eines Warenverteilzentrums, zusätzlich die Integration eines polysensoralen Systems in das Baustellenversorgungssystem. Eine weiterführende Diskussion zur Erfüllung der definierten Anforderungen erfolgt im Kontext der Systemanwendung des polysensoralen Systems sowie im Zuge der Integration des Baustellenversorgungssystems in das Baulogistikprozessmodell.

Im Fokus des polysensoralen Systems stehen die Materialstandorte und die Materialbestände im Warenverteilzentrum sowie auf der Baustelle und am Arbeitsplatz. Um eine Identifikation

und Lokalisierung der einzelnen, vorkommissionierten Versorgungspakete in Echtzeit zu ermöglichen sowie damit verbunden eine Überwachung und eine Digitalisierung des Materialflusses zu realisieren, sind die o. g. Versorgungspakete mit Sensoren auszustatten. Darüber hinaus sind die einzelnen Transportprozesse vom Produzenten oder Lieferanten zum Warenverteilzentrum und von dort zur Baustelle, auf der Baustelle selbst sowie zum Arbeitsplatz durch das polysensorale System in Echtzeit abzubilden. Im folgenden Kapitel werden daher zunächst die Anforderungen an das polysensorale System in technischer und funktionaler Hinsicht erläutert, um im weiteren Verlauf darauf aufbauend den Systemaufbau sowie den Systemablauf zu beschreiben und schließlich die Systemanwendung durchzuführen.

4.2.2 Systemanforderungen

Eine zielführende Systementwicklung erfordert u. a. die Definition von funktionalen und technischen Systemanforderungen. Diese Anforderungen ergeben sich bei der vorliegenden Arbeit durch einen iterativen Entwicklungsprozess und werden in den folgenden Kapiteln beschrieben.

4.2.2.1 Funktionale Systemanforderungen

Um das übergeordnete Ziel des Bauprozessmanagements im Kontext der Baustellenversorgung in Echtzeit zu erreichen sowie die im letzten Absatz des vorherigen Kapitels erläuterten Aufgaben des polysensoralen Systems erfüllen zu können, sind entsprechend dem ereignisbasierten Ansatz der Bauprozessidentifikation Ereignisse zu definieren, die über geeignete Sensoren zu erfassen sind. Hierzu sind zur Beschreibung der funktionalen Systemanforderungen in den Abbildungen 39 und 40 zwei exemplarische Prozessketten dargestellt.

Die Prozesskette in Abbildung 39 visualisiert den Fluss von Materialien, die für das System Warenverteilzentrum geeignet sind und über einen Lieferanten in Form des Baustoffhandels oder -produzenten dem Warenverteilzentrum zugeführt werden. Zur sensorischen Erfassung der im Folgenden definierten Ereignisse ist die Verwendung eines standardisierten, mit Sensoren ausgestatteten, Ladehilfsmittels in einem Mehrwegkreislauf eine Grundvoraussetzung. Über die Position des Ladehilfsmittels als Prozessindikator können u. a. Rückschlüsse auf die Ereignisse hinsichtlich der Lagerung sowie des Ein- und Ausgangs der Materialien beim Lieferanten, beim Warenverteilzentrum sowie auf der Baustelle und am Arbeitsplatz oder im Taktbereich gezogen werden. Darüber hinaus unterstützt die Erfassung der Position die Prozessidentifikation der Kommissionierung und des Einbaus. Diese beiden Prozesse können zusätzlich durch den Prozessindikator Gewicht des Ladehilfsmittels identifiziert werden. Der Prozess eines stattfindenden externen Transports kann über den Prozessindikator Bewegung des Ladehilfsmittels ermittelt werden.

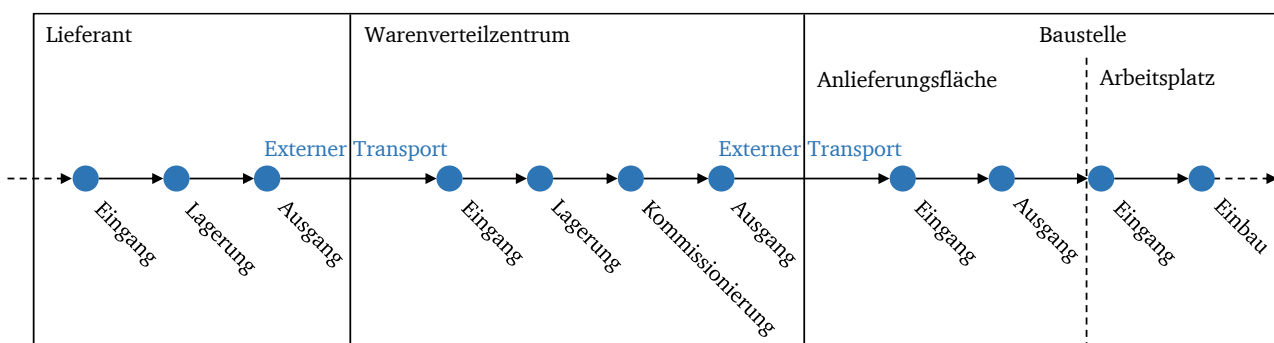


Abbildung 39: Prozesskette I – Sensorisch zu erfassende Ereignisse⁵⁹⁸

⁵⁹⁸ Eigene Darstellung

Tabelle 6 fasst die funktionalen Anforderungen an das polysensorale System respektive an die benötigten Sensoren für die Prozesskette in Abbildung 39 zusammen.

Tabelle 6: Funktionale Anforderungen an die Sensoren – Prozesskette I⁵⁹⁹

Prozessindikator – Messgröße des Sensors	Sensorisch zu erfassendes Ereignis
Position des Ladehilfsmittels	Material hat ... verlassen (Ausgang) Material hat ... erreicht (Eingang) Material wird gelagert Material wird kommissioniert Material wird eingebaut
Gewicht des Ladehilfsmittels	Material wird kommissioniert (Zunahme) Material wird eingebaut (Abnahme)
Bewegung des Ladehilfsmittels	Material wird transportiert

Die Prozesskette in Abbildung 40 veranschaulicht den Fluss von Materialien oder Bauteilen, die für das System Warenverteilzentrum ungeeignet sind und direkt vom Produzenten auf die Baustelle geliefert werden. Zur anschaulichen Darstellung wird im Folgenden exemplarisch eine Stahlbetonfertigteilstütze gewählt. Über deren Position als Prozessindikator können u. a. Rückschlüsse auf die Ereignisse hinsichtlich der Produktion, der Lagerung sowie des Ein- und Ausgangs der Stahlbetonfertigteilstütze beim Produzenten sowie auf der Baustelle und am Einbauort gezogen werden. Darüber hinaus unterstützt die Erfassung der Position neben dem Prozessindikator Neigung der Stahlbetonfertigteilstütze die Prozessidentifikation des Einbaus. Der Prozess eines stattfindenden externen Transports kann über den Prozessindikator Bewegung ermittelt werden.

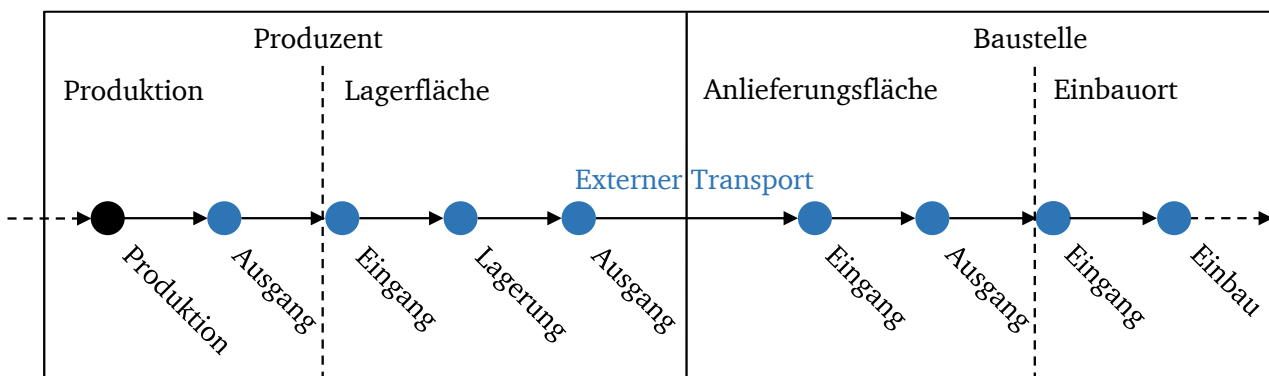


Abbildung 40: Prozesskette II – Sensorisch zu erfassende Ereignisse⁶⁰⁰

Tabelle 7 fasst die funktionalen Anforderungen an das polysensorale System respektive an die benötigten Sensoren für die Prozesskette in Abbildung 40 zusammen.

⁵⁹⁹ Eigene Darstellung

⁶⁰⁰ Eigene Darstellung

Tabelle 7: Funktionale Anforderungen an die Sensoren – Prozesskette II⁶⁰¹

Prozessindikator – Messgröße des Sensors	Sensorisch zu erfassendes Ereignis
Position der Stahlbetonfertigteilstütze	Bauteil ist produziert (Produktionsausgang) Bauteil hat ... verlassen (Ausgang) Bauteil hat ... erreicht (Eingang) Bauteil wird gelagert Bauteil wird eingebaut
Neigung der Stahlbetonfertigteilstütze	Bauteil wird eingebaut
Bewegung der Stahlbetonfertigteilstütze	Bauteil wird transportiert

Zusammenfassend sind die Prozessindikatoren Position, Gewicht, Neigung und Bewegung für das zu entwickelnde System von besonderer Relevanz und müssen durch die eingesetzten Sensoren zu erfassen sein. Es sei bereits an dieser Stelle angemerkt, dass eine singuläre Betrachtung einzelner Prozessindikatoren nicht immer eine zielführende Prozessidentifikation ermöglicht. Daher ist zur sicheren Prozessidentifikation eine Kombination mehrerer Sensoren und somit Prozessindikatoren im Sinne eines polysensoralen Systems anzustreben. Abschließend und ergänzend zu der dargestellten Anforderungsanalyse an das Baustellenversorgungssystem in Kapitel 4.1.5 sowie den beschriebenen funktionalen Systemanforderungen sei darauf hingewiesen, dass durch die angestrebten Prozessidentifikationen und den daraus ableitbaren Messungen der Materialströme, auch die von GRIEBEL und HEIM geforderte Verwendung der Baustofflieferung als Leistungsparameter⁶⁰² sowie die Ermittlung der Baustellenleistung durch eine Erfassung der Materialverbräuche⁶⁰³ realisierbar sind und durch das polysensorale System unterstützt werden.

4.2.2.2 Technische Systemanforderungen

Neben den funktionalen Systemanforderungen werden an das zu entwickelnde polysensorale System auch technische Systemanforderungen gestellt. Die Grundstruktur des gemeinsam entwickelten polysensoralen Systems und damit verbunden die technischen Systemanforderungen wurden bereits ausführlich von WEIL⁶⁰⁴ beschrieben und können grundsätzlich übernommen werden. Hinsichtlich der Datenerfassung und Datenübertragung, der Datenstrukturierung sowie der Datenaufbereitung und der Datenauswertung werden daher lediglich die Aspekte hervorgehoben, die sich auf Grund des differierenden Anwendungsbereichs des polysensoralen Systems bei der vorliegenden Arbeit ergeben.

⁶⁰¹ Eigene Darstellung

⁶⁰² Vgl. Griebel (2000): Der zeitnahe Soll-Ist-Vergleich aus Sicht der Baustelle, S. 186 ff.

⁶⁰³ Vgl. Heim (2002): Die zeitnahe Leistungsfeststellung auf Baustellen, S. 137 ff.

⁶⁰⁴ Vgl. Weil (2021): Ein Beitrag zur Anwendung der Lean Construction im schlüsselfertigen Hochbau, S. 118 ff.

Datenerfassung und Datenübertragung

Beim Einsatz von polysensoralen Systemen sorgt die Datenerfassung und -übertragung für die Bereitstellung sowie die Weiterleitung der benötigten Daten zur baubetrieblichen Prozesssteuerung.⁶⁰⁵ Die von WEIL⁶⁰⁶ beschriebenen Anforderungen an die Datenerfassung und -übertragung sind bezüglich des Anwendungsbereichs, der Infrastruktur sowie der Daten zu erweitern und zu präzisieren.

Für das in dieser Arbeit zu entwickelnde System ist zusätzlich zum Innenbereich auch eine Anwendung im Außenbereich zu realisieren. Des Weiteren ist nicht nur die lokale Baustelle zu betrachten, sondern darüber hinaus auch die vorgelagerten Produktionsstätten und das Warenverteilzentrum sowie die sich ergebenden Transportprozesse. Vor allem vor dem Hintergrund der Transportprozesse sind neben lokal arbeitenden Ortungssystemen auch globale Systeme einzubinden.

Bei den Anforderungen an die benötigte Infrastruktur und deren Widerstandsfähigkeit ergibt sich zusätzlich die Notwendigkeit von Schutzmaßnahmen, die aus den Einwirkungen und dem Einsatz im Außenbereich resultieren.

Die grundsätzlichen Anforderungen an die Daten selbst entsprechen den Ausführungen von WEIL⁶⁰⁷. Im Hinblick auf die Genauigkeit der Daten ist zu ergänzen, dass bei der Aufnahme der Bewegung zur echtzeitnahen Erfassung von externen Transportprozessen eine Genauigkeit von 200 m ausreichend ist. Bei der Bestimmung der Neigung zur echtzeitnahen Erfassung von Einbauprozessen ist eine eindeutige Differenzierung zwischen einer vertikalen und einer horizontalen Lage des Bauteils sicherzustellen. Die spezifischen Anforderungen an die Daten sind generell in Abhängigkeit zum jeweiligen Anwendungsfall zu bestimmen und werden im Zuge der Systemanwendung in Kapitel 4.2.5 konkretisiert.

Datenstrukturierung

Die Anforderungen an die Datenstrukturierung, die die Verarbeitung sowie die Weiterleitung der Daten zu den verschiedenen Anwendern fokussiert und sich im Wesentlichen aus der notwendigen Infrastruktur und den Daten selbst ergeben, können den Ausführungen von WEIL⁶⁰⁸ entnommen werden.⁶⁰⁹

Datenaufbereitung und Datenauswertung

Die Anforderungen an die Datenaufbereitung und -auswertung, die die anwendungsspezifische Datenverarbeitung fokussieren und sich im Wesentlichen aus den Aufgabenbereichen,

⁶⁰⁵ Vgl. Weil (2021): Ein Beitrag zur Anwendung der Lean Construction im schlüsselfertigen Hochbau, S. 118

⁶⁰⁶ Vgl. Weil (2021): Ein Beitrag zur Anwendung der Lean Construction im schlüsselfertigen Hochbau, S. 118 ff.

⁶⁰⁷ Vgl. Weil (2021): Ein Beitrag zur Anwendung der Lean Construction im schlüsselfertigen Hochbau, S. 119 f.

⁶⁰⁸ Vgl. Weil (2021): Ein Beitrag zur Anwendung der Lean Construction im schlüsselfertigen Hochbau, S. 120 f.

⁶⁰⁹ Vgl. Weil (2021): Ein Beitrag zur Anwendung der Lean Construction im schlüsselfertigen Hochbau, S. 120

den notwendigen Funktionen und den Daten selbst ergeben, können ebenfalls den Ausführungen von WEIL⁶¹⁰ entnommen werden.⁶¹¹

⁶¹⁰ Vgl. Weil (2021): Ein Beitrag zur Anwendung der Lean Construction im schlüsselfertigen Hochbau, S. 121 ff.

⁶¹¹ Vgl. Weil (2021): Ein Beitrag zur Anwendung der Lean Construction im schlüsselfertigen Hochbau, S. 121

4.2.3 Systemaufbau

Die zuvor beschriebenen funktionalen und technischen Systemanforderungen können durch ein IoT-Funksystem erfüllt werden. IoT-Funksysteme beinhalten, wie in Abbildung 41 dargestellt, prinzipiell eine Datenerfassung über Sensoren, eine Datenübertragung durch entsprechende Netzwerktechnologien sowie die Aspekte der Datenstrukturierung, der Datenaufbereitung und der Datenauswertung.

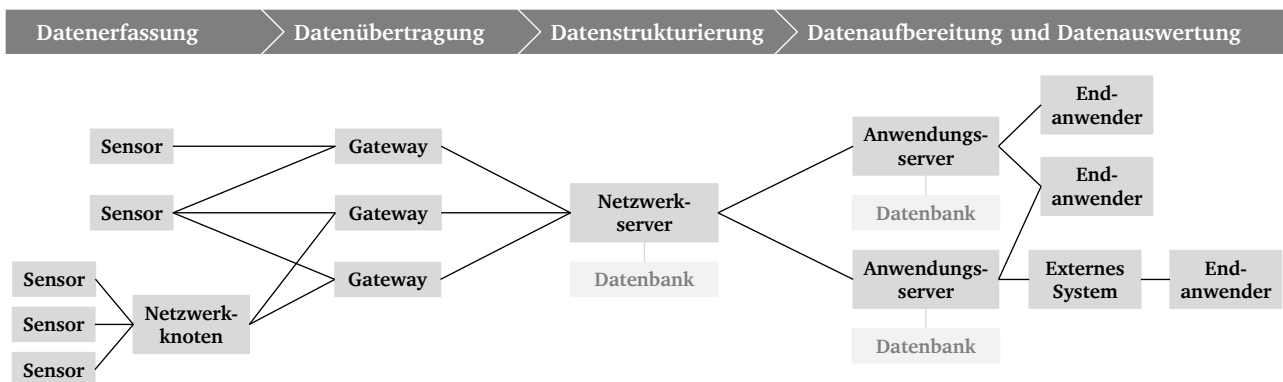


Abbildung 41: Systemaufbau des IoT-Funksystems⁶¹²

Die konkrete Datenerfassung erfolgt beim entwickelten System über Sensoren, die Werte hinsichtlich des Gewichts, der Neigung sowie der Bewegung und der Position aufnehmen und weitergeben. Als Technologien zur Datenübertragung dienen LoRaWAN, WLAN, BLE, UWB, GPS und der Mobilfunk sowie anwendungsspezifische Kombinationen derselbigen. Im Folgenden wird der in Abbildung 41 dargestellte Systemaufbau mit den entsprechenden Systemkomponenten weiterführend beschrieben.

4.2.3.1 Datenerfassung

Die im Kontext der funktionalen Systemanforderung definierten Messgrößen zur baubetrieblichen Prozessidentifikation werden durch verschiedene Sensoren aufgenommen. Aktoren kommen bei dem entwickelten IoT-Funksystem nicht zum Einsatz. In Abhängigkeit des Anwendungsfalls sowie dem intendierten Ziel und somit sensorspezifisch ist eine Funktechnologie auszuwählen. Hierbei sind Restriktionen der jeweiligen Sensoren im Hinblick auf die vorhandenen und integrierten Funkmodule der Sensoren zu beachten. Grundsätzlich ist es möglich, dass die Sensoren die Daten direkt über eine Funktechnologie an die Gateways senden oder dass die Sensoren nicht über ein entsprechendes Funkmodul zur Datenübermittlung an die Gateways verfügen und die Datenübermittlung über einen zusätzlichen Netzwerkknoten innerhalb des IoT-Funksystems erfolgen muss. Dieser Netzwerkknoten kann auch als Bridge bezeichnet werden und ermöglicht das Empfangen der durch die Sensoren erfassten

⁶¹² In Anlehnung an Motzko et al. (2021): Ausgewählte Aspekte des zeitnahen Controllings von Bauprojekten, S. 661

Daten sowie die Datenübermittlung an die Gateways. Die anwendungsspezifisch ausgewählten Sensoren werden im Zuge der verschiedenen Anwendungsfälle in Kapitel 4.2.5 konkretisiert.

4.2.3.2 Datenübertragung

Die Datenübertragung von den Sensoren zu den Gateways ist, wie bereits oben beschrieben, grundsätzlich abhängig von den in den Sensoren verbauten Funkmodulen. Im Fokus der Betrachtung des dargestellten IoT-Funksystems steht die Funktechnologie LoRa und die damit verbundene und speziell für IoT-Funksysteme entwickelte Netzwerktechnologie LoRaWAN, die die Systemarchitektur und das Kommunikationsprotokoll des Netzwerks beschreibt. Die Funktechnologie LoRa zeichnet sich u. a. dadurch aus, dass sie sicher und energieeffizient eine große Funkreichweite sowie eine Durchdringung von Gebäuden ermöglicht.⁶¹³ Indem die sensorisch erfassten Daten durch Gateways empfangen, gebündelt und weitergeleitet werden, dienen die Gateways als Schnittstelle zwischen den Sensoren und einem Netzwerkservers. Den Sensoren wird dabei kein spezielles Gateway zugeordnet, sodass die Daten von unterschiedlichen Gateways empfangen, gebündelt und weitergeleitet werden können. Die Weiterleitung von einem Gateway zu einem Netzwerkservers erfolgt in der Regel über Mobilfunk oder Ethernet. Das Gateway ermöglicht somit in seiner Funktion als Protokollumsetzer, die Kommunikation und den Datenaustausch zwischen den Sensoren und einem Netzwerkservers, obwohl diese beiden Elemente jeweils auf unterschiedliche Netzwerkprotokolle zurückgreifen.⁶¹⁴ Bei Anwendungsfällen mit relativ geringen Anforderungen an die Funkreichweite sowie einer unkritischen Gebäudedurchdringung oder sensorspezifischen Eigenschaften stellt die Funktechnologie WLAN eine Alternative zur Funktechnologie LoRa dar. Des Weiteren ist anwendungsspezifisch eine Ergänzung respektive Unterstützung durch weitere Funktechnologien wie bspw. BLE, UWB, GPS oder Mobilfunk zielführend. Die anwendungsspezifisch ausgewählten Funktechnologien zwischen Sensor und Gateway werden im Zuge der verschiedenen Anwendungsfälle in Kapitel 4.2.5 konkretisiert.

4.2.3.3 Datenstrukturierung

Die sensorisch erfassten Daten werden über ein Gateway an ein Netzwerkservers übertragen und auf diesem in einer Datenbank abgespeichert. Der Netzwerkservers verarbeitet die Daten, in dem er bspw. redundante Daten, die von mehreren Gateways empfangen und weitergeleitet wurden, herausfiltert und löscht. Darüber hinaus verwaltet der Netzwerkservers die verschiedenen Komponenten des Netzwerks. Als Netzwerkservers sind Webserver vor Ort oder cloudbasierte Webserver möglich. Ein Zugriff der Nutzer auf den Netzwerkservers und somit

⁶¹³ Vgl. COUNT+CARE (2018): LoRaWAN – Allgemein, Präsentationsfolie 4

⁶¹⁴ Vgl. Baun (2015): Computernetze kompakt, S. 22

auf die Daten wird durch standardisierte Schnittstellen zwischen dem Netzwerkserver und dem Anwendungsserver gewährleistet. Der Netzwerkserver ordnet die Daten den verschiedenen Anwendungsservern zu und übermittelt diese.⁶¹⁵

4.2.3.4 Datenaufbereitung und Datenauswertung

Die anwendungsspezifische Datenverarbeitung erfolgt auf den Anwendungsservern. Durch den Zugriff entsprechender Anwendungssoftware auf die separate Datenbank des Anwendungsservers ist es möglich, die Daten zu analysieren sowie zu visualisieren und somit dem Nutzer zugänglich zu machen. Die Bereitstellung kann über Benutzeroberflächen in Form von bspw. Websites oder Apps sowie mit der damit einhergehenden Nutzung von Dashboards erfolgen. Außerdem können die auf den Anwendungsservern gespeicherten Daten exportiert und mittels standardisierten Schnittstellen externen Systemen wie bspw. einem Bauwerksmodell zur Verfügung gestellt werden. Weiterführende Informationen zur Darstellung der Daten über Dashboards sowie zur Einbindung eines Bauwerksmodells in das IoT-Funksystem können WEIL⁶¹⁶ entnommen werden. Neben der Bereitstellung, der Zugänglichkeit und der Visualisierung der Daten für den Nutzer sollte die Datenaufbereitung und Datenauswertung auch für eine Integration von Prognosemodellen sorgen und somit eine Verbindung zur Prozessregelung ermöglichen.

⁶¹⁵ Vgl. LoRa Alliance (2015): LoRaWAN. What is it?, S. 8 ff.

⁶¹⁶ Vgl. Weil (2021): Ein Beitrag zur Anwendung der Lean Construction im schlüsselfertigen Hochbau, S. 127 f.

4.2.4 Systemablauf

Der im vorherigen Kapitel dargelegte Systemaufbau wird durch den in Abbildung 42 visualisierten Systemablauf präzisiert und ergänzt.

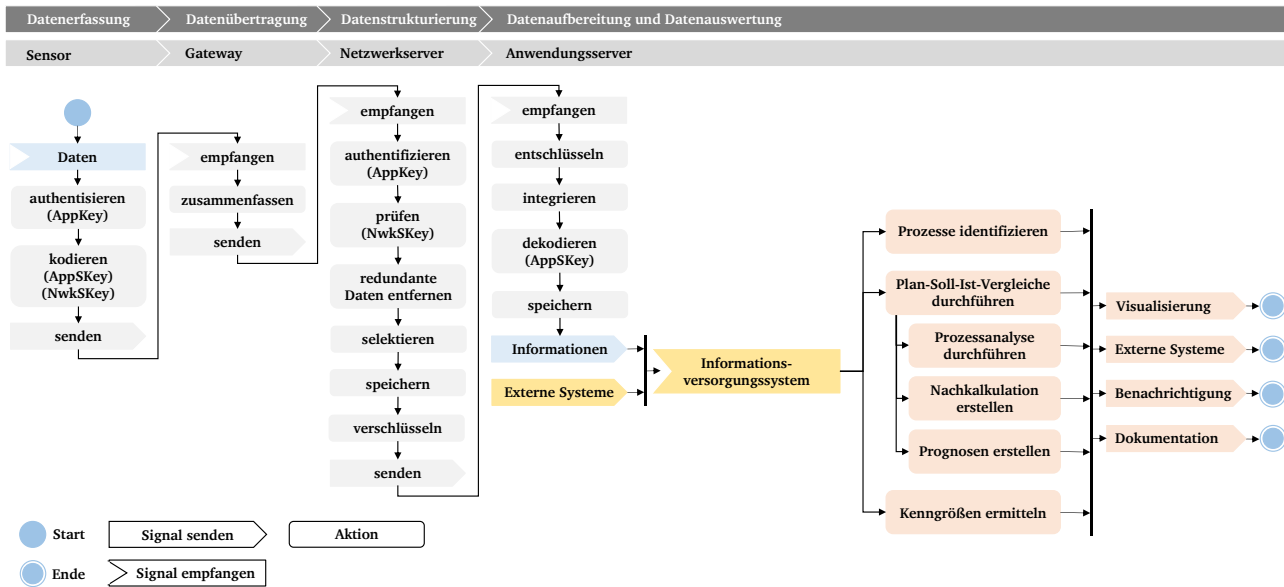


Abbildung 42: Systemablauf des IoT-Funksystems⁶¹⁷

Der Sensor wird zu Beginn über einen Aktivierungsprozess einmalig im Netzwerk angemeldet und somit in das Netzwerk eingebunden. Mit dem Aktivierungsprozess geht eine Authentifizierung zwischen dem Sensor und dem Netzwerkserver einher. Zur weiteren sicheren Datenübertragung werden für jede Übertragung verschiedene Sitzungsschlüssel generiert und zur Kodierung oder Dekodierung sowie zur Authentifizierung und Prüfung der gesendeten Daten genutzt.⁶¹⁸ Die weiteren Aktionen innerhalb des Sensors, des Gateways sowie des Netzwerkserverns können Abbildung 42 entnommen werden. Im weiteren Verlauf soll der Ablauf hinsichtlich der Datenaufbereitung sowie der Datenauswertung und somit der Anwendungsserver im Fokus stehen.

Die von den Sensoren erfassten Daten werden in einen baubetrieblichen und baugewerblichen Kontext gesetzt und hierdurch als Informationen für den Anwender in Form eines baugewerblichen Informationsversorgungssystems nutzbar. Die im Zuge der funktionalen Systemanforderungen in Abbildung 39 und Abbildung 40 dargestellten Prozessketten sind digital abzubilden und in Echtzeit mit den baugewerblich relevanten Informationen anzureichern. Die Informationsdarstellung erfolgt entweder über digitale Benutzeroberflächen in Form von bspw. Websites oder Apps sowie mit der damit einhergehenden Nutzung von Dashboards

⁶¹⁷ In Anlehnung an Weil (2021): Ein Beitrag zur Anwendung der Lean Construction im schlüsselfertigen Hochbau, S. 129 weiterentwickelt

⁶¹⁸ Vgl. Weil (2021): Ein Beitrag zur Anwendung der Lean Construction im schlüsselfertigen Hochbau, S. 129

oder über externe Systeme wie bspw. einem Bauwerksmodell. Neben der reinen und anwenderspezifischen Informationsversorgung und -darstellung sowie der damit verbundenen Deckung des individuellen Informationsbedarfs sind die Daten respektive Informationen darauf aufbauend auch im Hinblick auf Prozessidentifikationen, Plan-Soll-Ist-Vergleiche, Nachkalkulationen, Prognosen sowie der Kenngrößenermittlung und -speicherung zu nutzen. Hierbei unterstützt der automatisierte und prozessorientierte Systemablauf die Prozessverantwortlichen und reduziert fehleranfällige manuelle Prozesse, die durch eine ungenaue oder unvollständige Datenerfassung geprägt sind.

Die automatisierte Prozessidentifikation, unterstützt durch polysensorale Systeme, ist eine wesentliche Grundlage für ein Bauprozessmanagement in Echtzeit. Wie bereits ausgeführt, sind hierbei die Ansätze einer status- und ereignisbasierten Prozessidentifikation voneinander zu differenzieren. Die vorliegende Arbeit verfolgt den Ansatz einer ereignisbasierten Prozessidentifikation. Die hierzu erforderlichen Prozessindikatoren und die detektierbaren Prozessmerkmale sowie die daraus identifizierbaren Ereignisse stehen in Zusammenhang mit den beschriebenen funktionalen Systemanforderungen und sind daher in Kapitel 4.2.2.1 definiert. Zur weiteren Vertiefung der ereignisbasierten Prozessidentifikation sowie deren Anwendung wird auf MOTZKO et al.⁶¹⁹ sowie BINDER⁶²⁰ und WEIL⁶²¹ verwiesen.

Durch das o. g. bauleistungsorientierte Informationsversorgungssystem können die entsprechenden Prozesse gesteuert und geregelt werden. Im Fokus steht hierbei die kurzfristige Steuerung und somit das Kontrollieren sowie das Regulieren und aktive Eingreifen in laufende Prozesse. Die dazu erforderliche Integration des entwickelten Systems in den kybernetischen Regelkreis der baubetrieblichen Prozesssteuerung kann WEIL⁶²² entnommen werden. Der Systemablauf ermöglicht die bereits o. g. Plan-Soll-Ist-Vergleiche sowie im Zuge dessen, bei festgestellten Abweichungen, eine automatisierte Benachrichtigung der Prozessbeteiligten in Echtzeit. Die Ergebnisse der Plan-Soll-Ist-Vergleiche dienen darüber hinaus auch der Nachkalkulation abgeschlossener Projekt sowie der Prognose hinsichtlich laufender oder geplanter Prozesse. Die Ist-Größen entsprechen den in Echtzeit sensorisch erfassten sowie aufbereiteten Daten und werden mit den Plan- oder Soll-Größen verglichen. Die Plan-Größen ergeben sich auf der Grundlage von definierten Zielen. Die Soll-Größen stellen eine Verknüpfung zwischen den Plan-Größen und den tatsächlich erbrachten Werten dar. Nachfolgend zum Plan-Soll-Ist-Vergleich sind bei einer Abweichung auf Basis einer Prozessanalyse die Ursachen und Konsequenzen der Abweichung zu identifizieren sowie ggf. mögliche Steuerungsmaßnahmen abzuleiten und umzusetzen. Eine Prozessanalyse ist zur Erschließung von Verbesserungspoten-

⁶¹⁹ Motzko et al. (2013): Grundlagen des Bauprozessmanagements

⁶²⁰ Binder (2014): Ereignisbasierte Steuerung bauleistungsorientierter Prozesse mit Echtzeit-Ordnungssystemen

⁶²¹ Weil (2021): Ein Beitrag zur Anwendung der Lean Construction im schlüsselfertigen Hochbau

⁶²² Vgl. Weil (2021): Ein Beitrag zur Anwendung der Lean Construction im schlüsselfertigen Hochbau, S. 131 ff.

ziales auch zu empfehlen, wenn beim Plan-Soll-Ist-Vergleich keine Abweichung vorliegt. Abschließend ist das erzeugte Wissen zu dokumentieren und dem projektübergreifenden Wissensmanagement zuzuführen.^{623, 624}

Im Kontext des Wissensmanagements kann der beschriebene Systemablauf mit der Wissens-treppe nach NORTH⁶²⁵ verknüpft werden. Die in Form von Zeichen vorliegenden Sensorsig-nale werden erfasst und durch den Sensor und die Gateways als Daten übertragen und auf Servern gespeichert. Die Server strukturieren diese Daten und setzen sie in einen baubetrieb-lichen und baulegistischen Kontext, sodass die Daten dem Anwender als nutzbare Informati-onen und Wissen zur Verfügung stehen. Die durchgeführten Prozessidentifikationen, Plan-Soll-Ist-Vergleiche, Nachkalkulationen, Prognosen oder Alarmierungen im Zuge der Daten-aufbereitung und der Datenauswertung basieren auf einer Anwendung des generierten Wis-sens, im Speziellen des baulegistischen Prozesswissens und lösen schließlich Handlungen aus. Durch bspw. Kenngrößenmessungen und -speicherungen dient der Systemablauf im weiteren Verlauf dem Kompetenzerwerb aller Beteiligten und unterstützt die Wettbewerbs-fähigkeit der entsprechenden Organisation.

⁶²³ Vgl. Pflug (2008): Ein Bildinformationssystem zur Unterstützung der Bauprozesssteuerung, S. 19 f.

⁶²⁴ Vgl. Weil (2021): Ein Beitrag zur Anwendung der Lean Construction im schlüsselfertigen Hochbau, S. 132 f.

⁶²⁵ Vgl. North (2021): Wissensorientierte Unternehmensführung, S. 33 ff.

4.2.5 Systemanwendung

Im Folgenden wird das in den vorherigen Kapiteln entwickelte und dargestellte System anhand verschiedener Anwendungsfälle in Form von Labor- und Feldversuchen beprobt und evaluiert. Die konkreten Anwendungsfälle respektive die Labor- und Feldversuche werden hinsichtlich des Untersuchungsinhalts, der Systemumsetzung sowie des Systemeinsatzes und der Systembewertung beschrieben und entsprechend gegliedert. Als Anwendungsfälle werden im Kontext des „Intelligenten Materialflusses“ die „Intelligente Palette“ und das „Intelligente Bauteil“ definiert. Dabei werden zunächst die Anwendungsfälle der „Intelligenten Palette“ sowie des „Intelligenten Bauteils“ singular betrachtet und erläutert, um sie anschließend vor dem Hintergrund des Systems Warenverteilzentrum sowie der in Kapitel 4.2.2.1 definierten funktionalen Systemanforderungen im Gesamtzusammenhang des „Intelligenten Materialflusses“ weiterzuentwickeln und zu diskutieren.

4.2.5.1 Anwendungsfall „Intelligente Palette“

Der Anwendungsfall der „Intelligenten Palette“ fokussiert die sensorische Erfassung der Position sowie des Gewichts der Palette. Der gemeinsam entwickelte Anwendungsfall ist bereits detailliert von WEIL⁶²⁶ beschrieben. Die nachfolgenden Ausführungen stellen somit zunächst eine Zusammenfassung hinsichtlich des von WEIL⁶²⁷ dokumentierten Untersuchungsinhalts, der Systemumsetzung sowie des Systemeinsatzes und der Systembewertung dar. Die Beschreibungen von WEIL⁶²⁸ behandeln im Kern die Versorgung des einzelnen Arbeitsplatzes und somit die kontinuierliche Überwachung der Materialflüsse auf der Baustelle. Diese Beschreibungen sind durch eine Betrachtung im Kontext der Baustellenversorgung im Rahmen des Anwendungsfalls „Intelligenter Materialfluss“ zu ergänzen und zu erweitern. Darüber hinaus wird als Ergänzung zu den bereits dargelegten Laborversuchen der erste durchgeführte Laborversuch dokumentiert und im weiteren Verlauf dieses Kapitels schwerpunktmäßig behandelt.

Untersuchungsinhalt

Der erste Laborversuch zur sensorischen Erfassung der Position sowie des Gewichts eines Förderhilfsmittels erfolgt in den Räumlichkeiten des Kooperationspartners, der COUNT+CARE GmbH & Co. KG in Darmstadt. Darauf aufbauende Laborversuche erfolgen am Institut für Baubetrieb der Technischen Universität Darmstadt. Die Laborversuche beinhalten die Erprobung von zwei verschiedenen Ortungssystemen, die jeweils mit Funkortung sowie weiterer Sensorik ausgestattet sind und somit ein polysensorales System darstellen.

⁶²⁶ Vgl. Weil (2021): Ein Beitrag zur Anwendung der Lean Construction im schlüsselfertigen Hochbau, S. 156 ff.

⁶²⁷ Vgl. Weil (2021): Ein Beitrag zur Anwendung der Lean Construction im schlüsselfertigen Hochbau, S. 156 ff.

⁶²⁸ Vgl. Weil (2021): Ein Beitrag zur Anwendung der Lean Construction im schlüsselfertigen Hochbau, S. 156 ff.

Die Laborversuche erfolgen sowohl beim Kooperationspartner als auch am Institut für Baubetrieb im Innenbereich.⁶²⁹

Systemumsetzung

In der folgenden Abbildung sind die verschiedenen Systemkomponenten dargestellt.

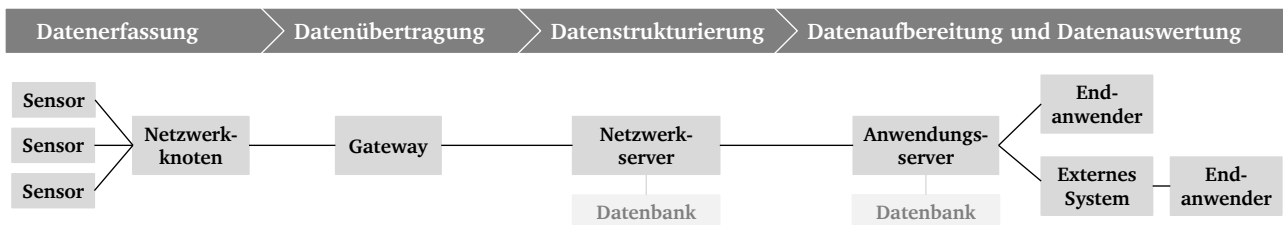


Abbildung 43: Systemaufbau des IoT-Funksystems – Anwendungsfall „Intelligente Palette“⁶³⁰

Die sensorische Datenerfassung beinhaltet bei der intelligenten Palette die Gewichts- und Positionsbestimmung der Palette innerhalb eines Gebäudes. In Abbildung 44 ist die erste Entwicklungsstufe der intelligenten Palette dargestellt. Für eine leichtere Handhabung während der Laborversuche wird im frühen Entwicklungsstadium ein Plattformwagen anstelle einer Palette verwendet.



Abbildung 44: „Intelligente Palette“ (links) und Gewichtssensor im Detail (rechts)⁶³¹

Die Gewichtsbestimmung erfolgt über einen Gewichtssensor. Dieser besteht, wie in Abbildung 45 dargestellt, aus einer Balkenwägezelle, aus einer Auswerteeinheit, die das Gewicht erfasst und als digitales Signal weitergibt sowie aus entsprechenden Kabeln zur Kommunikation mit dem Netzwerk-knoten.⁶³² Die raumweise Positionsbestimmung erfolgt über die Funktechnologie LoRa in Verbindung mit BLE. Die verwendeten Beacons zur raumweisen Positionsbestimmung sind ebenfalls in Abbildung 45 dargestellt.

⁶²⁹ Vgl. Weil (2021): Ein Beitrag zur Anwendung der Lean Construction im schlüsselfertigen Hochbau, S. 157

⁶³⁰ In Anlehnung an Motzko et al. (2021): Ausgewählte Aspekte des zeitnahen Controllings von Bauprojekten, S. 661 weiterentwickelt

⁶³¹ In Anlehnung an Burmeister (2019): Durchführung einer Laborstudie zur Lokalisierung von Baustoffen mittels sensorgestützter IoT-Technologie, S. 66 f.

⁶³² Vgl. Burmeister (2019): Durchführung einer Laborstudie zur Lokalisierung von Baustoffen mittels sensorgestützter IoT-Technologie, S. 67

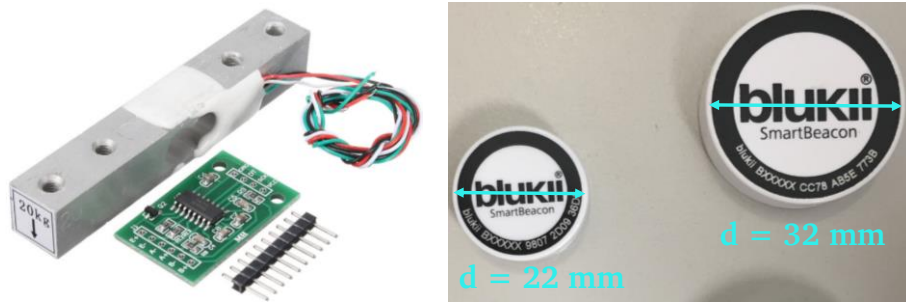


Abbildung 45: Sensoren „Intelligente Palette“ – Gewichtssensor (links) und Beacons (rechts)⁶³³

Zur raumweisen Positionsbestimmung wird jeder Raum mit einem Beacon ausgestattet. Dieser Beacon sendet in kontinuierlichen Intervallen Signale, welche durch den Netzwerkknoten, auch Bridge genannt, empfangen werden, sobald die Palette in den Signalbereich des Beacons eintritt. Anschließend werden diese Signale zur Identifizierung und raumweisen Positionsbestimmung der Palette genutzt. Auf Grund von Abschirmungseffekten ist die Reichweite der einzelnen Beacons auf einen Raum begrenzt und somit eine eindeutige raumweise Positionsbestimmung der Palette möglich. Die Kommunikation zwischen Gewichtssensor und Netzwerkknoten erfolgt kabelgebunden, die zwischen Beacon und Netzwerkknoten mittels BLE. Bei dem Netzwerkknoten handelt es sich um einen Einplatinencomputer, der mit einem LoRa-Funkmodul ausgestattet ist. Der Netzwerkknoten bündelt die Gewichts- und Positionsdaten und übermittelt diese per LoRa an das Gateway.⁶³⁴

Die beschriebenen Komponenten sind, entsprechend Abbildung 46, an der Unterseite des Plattformwagens montiert. Neben der Auswerteeinheit der Wägezelle (A) und der Bridge (B) zeigt die Abbildung einen Akku zur Stromversorgung (C) sowie zur Datenübertragung eine an die Bridge angeschlossene Stabantenne (D).⁶³⁵

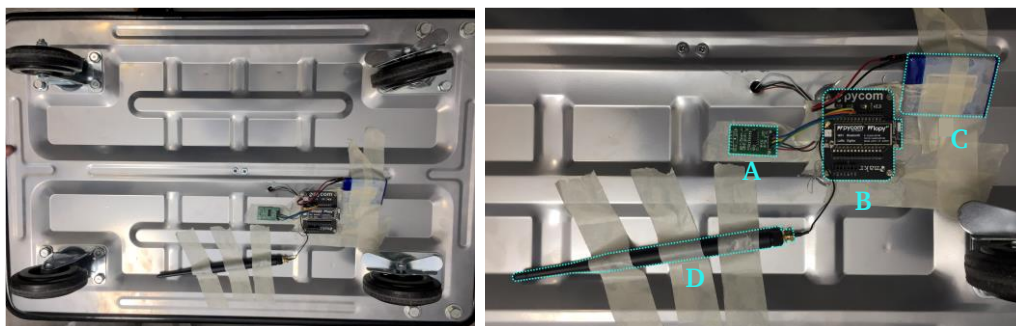


Abbildung 46: Unterseite „Intelligente Palette“⁶³⁶

⁶³³ In Anlehnung an Burmeister (2019): Durchführung einer Laborstudie zur Lokalisierung von Baustoffen mittels sensorgestützter IoT-Technologie, S. 67 f.

⁶³⁴ Vgl. Weil (2021): Ein Beitrag zur Anwendung der Lean Construction im schlüsselfertigen Hochbau, S. 158 f.

⁶³⁵ Vgl. Burmeister (2019): Durchführung einer Laborstudie zur Lokalisierung von Baustoffen mittels sensorgestützter IoT-Technologie, S. 67 f.

⁶³⁶ In Anlehnung an Burmeister (2019): Durchführung einer Laborstudie zur Lokalisierung von Baustoffen mittels sensorgestützter IoT-Technologie, S. 67 f.

Die Anordnung der Beacons bei den Laborversuchen beim Kooperationspartner sowie am Institut für Baubetrieb können nachfolgender Abbildung entnommen werden.

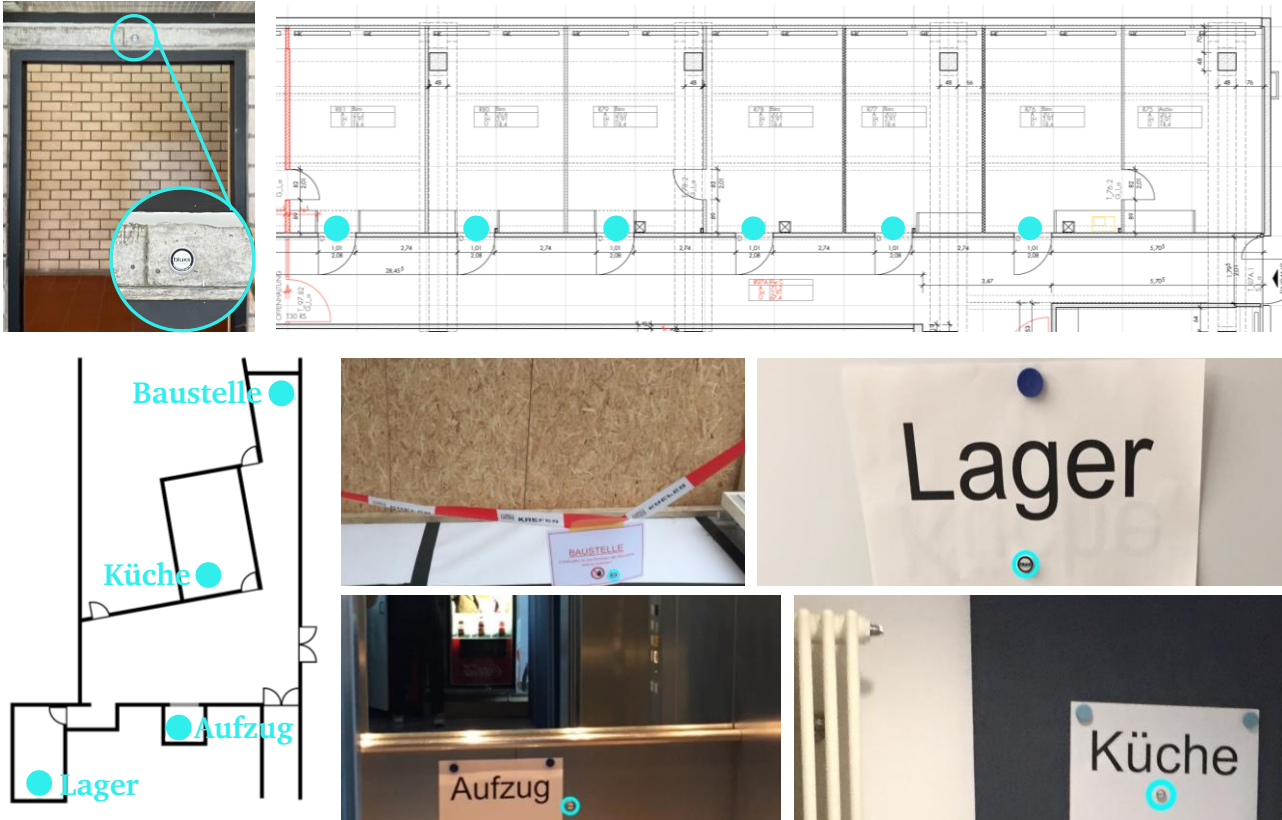


Abbildung 47: Anordnung der Beacons – Institut für Baubetrieb (oben)⁶³⁷ und Kooperationspartner (unten)⁶³⁸

Zur Erhöhung der Genauigkeit der Positionsbestimmung wird in einem weiteren Entwicklungsschritt die Funktechnologie BLE durch UWB ersetzt. Durch den Einsatz von UWB ist eine Positionsbestimmung der Palette im Raum mit einer Genauigkeit von ca. 1 m möglich. Da die exakte Positionsbestimmung im Innenraum für die vorliegende Arbeit von untergeordneter Relevanz ist, wird zur weiteren Erläuterung der zweiten Entwicklungsstufe der intelligenten Palette auf WEIL⁶³⁹ sowie NORRDINE/MOTZKO⁶⁴⁰ verwiesen.

Die Datenübertragung erfolgt bei den Laborversuchen beim Kooperationspartner als auch am Institut für Baubetrieb über fest installierte Gateways. Für die Versuche am Institut für Baubetrieb wird das Gateway auf dem Dach des Architekturgebäudes genutzt. Für die Versuche

⁶³⁷ In Anlehnung an Weil (2021): Ein Beitrag zur Anwendung der Lean Construction im schlüsselfertigen Hochbau, S. 159

⁶³⁸ In Anlehnung an Burmeister (2019): Durchführung einer Laborstudie zur Lokalisierung von Baustoffen mittels sensorgestützter IoT-Technologie, S. 77 und S. 80

⁶³⁹ Vgl. Weil (2021): Ein Beitrag zur Anwendung der Lean Construction im schlüsselfertigen Hochbau, S. 159 ff.

⁶⁴⁰ Norrdine/Motzko (2020): An internet of things based transportation cart for smart construction site

beim Kooperationspartner können die Gateways auf dem Dach des Bürogebäudes des Kooperationspartners genutzt werden.



Abbildung 48: Standort der Gateways – Institut für Baubetrieb (links und mittig)⁶⁴¹ und Kooperationspartner (rechts)⁶⁴²

Die Datenstrukturierung erfolgt auf einem Netzwerkservers. Dieser ordnet die Daten dem jeweiligen Anwendungsserver zu und übermittelt diese entsprechend.

Die Datenaufbereitung sowie die Datenauswertung und somit die Datenverarbeitung erfolgen auf dem Anwendungsserver. Beim ersten Laborversuch des Anwendungsfalls erfolgt die Darstellung der Daten wie in Abbildung 49 gezeigt in Tabellenform.

TUD - Palettentracking						WebSocket Application		
Device EUI	Local time	Freq [MHz]	Data rate	RSSI	SNR	Seq #	Port	Payload
70B3D5499390A31C	4.3.2019, 14:35:44	867.900	SF7 BW125 4/5	-119	1.8	19	2	Gewicht:0 Raum: 103
70B3D5499390A31C	4.3.2019, 14:34:30	867.700	SF7 BW125 4/5	-114	5.8	18	2	Gewicht:0 Raum: 103
70B3D5499390A31C	4.3.2019, 14:33:16	868.300	SF7 BW125 4/5	-113	3.2	17	2	Gewicht:0 Raum: 103
70B3D5499390A31C	4.3.2019, 14:32:01	868.100	SF7 BW125 4/5	-113	3.8	16	2	Gewicht:0 Raum: 103
70B3D5499390A31C	4.3.2019, 14:30:46	867.100	SF7 BW125 4/5	-117	3.5	15	2	Gewicht:0 Raum: 103

Abbildung 49: Dashboard „Intelligente Palette“⁶⁴³

Jede Zeile der Tabelle entspricht einer einzelnen Datenerfassung. Die einzelnen Spalten geben dabei die jeweils übertragenen Daten wieder. Die erste Spalte von links beinhaltet die eindeutige Identifikation der Palette. Da bei den ersten Laborversuchen nur eine Palette zum Einsatz kommt, ist diese Spalte bei allen Datenübertragungen identisch. Die nächste Spalte

⁶⁴¹ In Anlehnung an Weil (2021): Ein Beitrag zur Anwendung der Lean Construction im schlüsselfertigen Hochbau, S. 162

⁶⁴² In Anlehnung an Burmeister (2019): Durchführung einer Laborstudie zur Lokalisierung von Baustoffen mittels sensorgestützter IoT-Technologie, S. 32

⁶⁴³ In Anlehnung an Burmeister (2019): Durchführung einer Laborstudie zur Lokalisierung von Baustoffen mittels sensorgestützter IoT-Technologie, S. 70

protokolliert das Datum und die Uhrzeit des Datenempfangs. Das Sendeintervall wird für die Laborversuche, um unnötig lange Wartezeiten zu vermeiden, auf ca. 1 Minute und 15 Sekunden festgelegt. Bei Feldversuchen respektive dem Baustelleneinsatz ist das Sendeintervall im Spannungsfeld zwischen einer geringen Akkulaufzeit auf Grund eines hohen Sendeintervalls und der erforderlichen zeitlichen Genauigkeit der Daten zu diskutieren und festzulegen. Die dritte bis achte Spalte enthalten verschiedene Empfangsparameter der Funktechnologie LoRa. Hierzu zählen die Frequenz, die Datenrate, die Signalstärke, das Signal-Rausch-Verhältnis sowie eine fortlaufende Nummerierung der empfangenen Datenpakete und eine Angabe des verwendeten Ports der Datenübertragung. In der Spalte ganz rechts werden unter Payload das erfasste Gewicht in Kilogramm sowie der Standort der Palette angegeben. Das erfasste Gewicht wird hierbei auf 0,5 Kilogramm gerundet. Anstelle der übertragenen ID des erfassten Beacons wird die konkrete Raumnummer angegeben. Hierzu sind die Raumnummern oder auch verschiedene Raumbezeichnungen vorab mit der ID des jeweiligen Beacons zu referenzieren.⁶⁴⁴

Systemeinsatz

Für den Systemeinsatz des Anwendungsfalls wird die intelligente Palette im Kontext eines Warenverteilzentrums diskutiert. Hierzu werden in einem Laborversuch die vier wesentlichen Bereiche der in Abbildung 50 dargestellten Prozesskette nachgebildet. Das aktuelle Gewicht und die bereichsweise Position der Palette sind beim Lieferanten, im Warenverteilzentrum, auf der Baustelle sowie am Arbeitsplatz zu erfassen. Abbildung 50 stellt die Bereiche sowie die Prozesskette in Abbildung 39 in komprimierter Form dar. Die Positionsbestimmung erfolgt über die Funktechnologie LoRa in Verbindung mit BLE. Die nachfolgenden Erläuterungen beziehen sich daher auf die erste Entwicklungsstufe der intelligenten Palette.

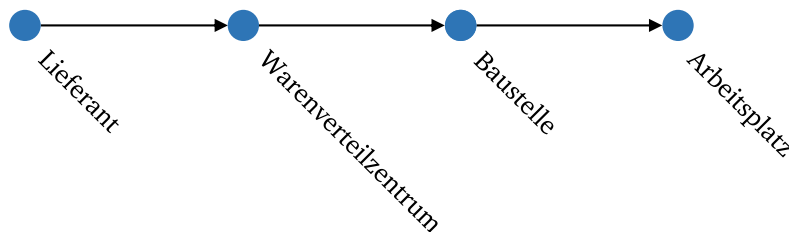


Abbildung 50: Prozesskette „Intelligente Palette“⁶⁴⁵

Grundgedanke des Laborversuchs ist die Nachbildung des Materialflusses in Form einer Palette entlang der in Abbildung 50 dargestellten Prozesskette sowie damit einhergehend die sensorische Erfassung des Materialflusses. Damit verbunden ist vor dem Hintergrund der Bauprozesssteuerung die Durchführung von Mengen-Plan-Soll-Ist-Vergleichen auf Basis des

⁶⁴⁴ Vgl. Burmeister (2019): Durchführung einer Laborstudie zur Lokalisierung von Baustoffen mittels sensorgestützter IoT-Technologie, S. 69 f.

⁶⁴⁵ Eigene Darstellung

Gewichts der Palette sowie von Termin-Plan-Soll-Ist-Vergleichen auf Basis des Zeitpunkts des Eintreffens der Palette in einen bestimmten Bereich. An dieser Stelle sei angemerkt, dass im weiteren Verlauf von Plan-Ist-Vergleichen anstatt von Plan-Soll-Ist-Vergleichen gesprochen wird. Dies beruht auf der Annahme, dass die Plan-Größen keine Änderungen erfahren und die Soll-Größen somit den Plan-Größen entsprechen. Bei einer Veränderung der Plan-Größen und somit davon abweichenden Soll-Größen handelt es sich um Soll-Ist-Vergleiche.

Im Zuge der funktionalen Systemanforderung in Kapitel 4.2.2.1 sind in Abbildung 39 und in Tabelle 6 verschiedene Prozessindikatoren sowie zu identifizierende Ereignisse definiert. Beim vorliegenden Anwendungsfall, der den ersten Laborversuch beschreibt, werden zunächst lediglich die Anwesenheit der Palette in einem bestimmten Bereich sowie das aktuelle Gewicht der Palette als Ereignisse definiert. Die weiteren in Kapitel 4.2.2.1 definierten Ereignisse sind Gegenstand der weiteren Anwendungsfälle. Für eine zielführende Analyse sind die definierten Ereignisse in einen raum-zeitlichen Zusammenhang zu bringen. Hierzu zählt bspw. das Eintreffen der Palette in einen bestimmten Bereich zu einem bestimmten Zeitpunkt oder das Gewicht der Palette in einem bestimmten Bereich zu einem bestimmten Zeitpunkt.

Die Nachbildung des Materialflusses erfolgt durch das Abfahren der verschiedenen, mit Beacons ausgestatteten Bereiche mit dem Plattformwagen innerhalb der Räumlichkeiten des Kooperationspartners. Außerdem wird der Plattformwagen be- und entladen. Durch diese Versuchsdurchführung können die intendierten Funktionalitäten des entwickelten Systems erprobt und beurteilt werden.

In Abbildung 51 sind exemplarische Be- und Entladeprozesse und die tabellarische Ausgabe einer Messreihe dokumentiert. Es ist festzustellen, dass das erfasste und übertragene Gewicht dem realen Gewicht des Plattformwagens entspricht.

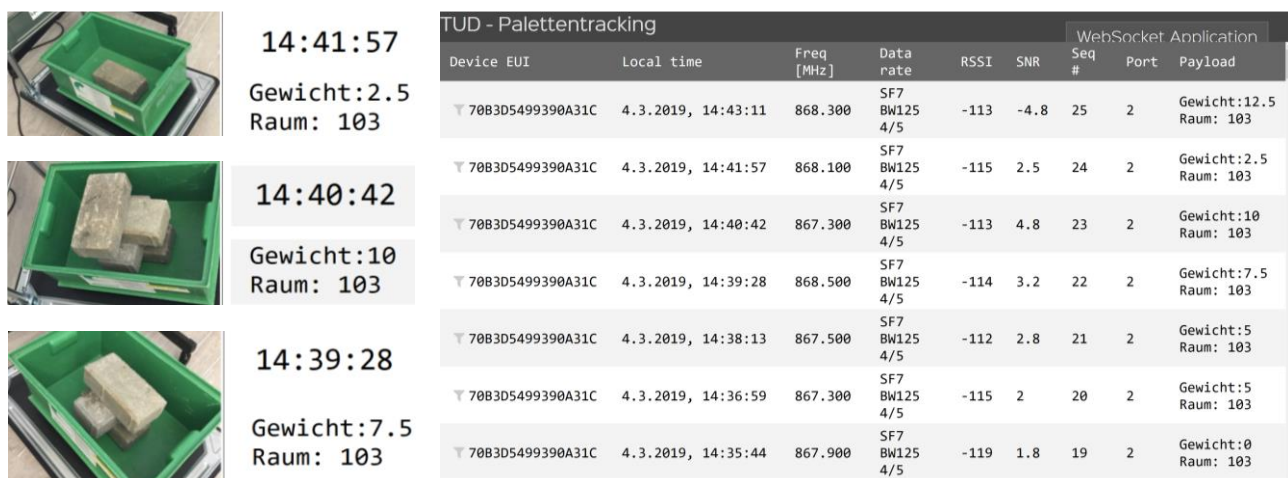


Abbildung 51: Be- und Entladeprozesse „Intelligente Palette“⁶⁴⁶

⁶⁴⁶ In Anlehnung an Burmeister (2019): Durchführung einer Laborstudie zur Lokalisierung von Baustoffen mittels sensorgestützter IoT-Technologie, S. 75 und S. XXIV

Abbildung 52 zeigt die auf der Benutzeroberfläche dargestellten relevanten Daten, die während des Abfahrens der Bereiche mit dem Plattformwagen übertragen werden. Die Raumbezeichnungen entsprechen hierbei den örtlichen Gegebenheiten beim Kooperationspartner und nicht den definierten Bereichen in Abbildung 50. Im Bereich Lager wird der Plattformwagen beladen.

Payload	Payload	Payload	Payload	Payload
Gewicht:0 Raum: Baustelle	Gewicht:0 Raum: Lager	Gewicht:2.5 Raum: Lager	Gewicht:2.5 Raum: Aufzug	Gewicht:2.5 Raum: Küche

Abbildung 52: Raumweise Positionsbestimmung „Intelligente Palette“⁶⁴⁷

Es ist festzuhalten, dass der erfasste und übertragene Raum dem realen Standort des Plattformwagens entspricht. Die über ein Bluetooth-Signal vom Beacon übertragene ID des Beacons wird korrekt erfasst. Anhand der empfangenen Signalstärke kann der zum Plattformwagen räumlich nächst gelegene Beacon identifiziert werden. Dies ermöglicht eine raumweise Positionsbestimmung des Plattformwagens.

Im Folgenden werden die erzielten Ergebnisse im Hinblick auf den Systemeinsatz bei einem Warenverteilzentrum dargestellt und entsprechend übertragen. Darüber hinaus kann das entwickelte System zur bereichsweisen Positionsbestimmung einer Palette beim Lieferanten, auf der Baustelle sowie am Arbeitsplatz oder im Taktbereich eingesetzt werden. Des Weiteren erlaubt das System neben dem Standort, auch das aktuelle Gewicht der Palette zu erfassen und lässt somit Rückschlüsse auf mögliche Kommissionier- oder Einbauprozesse zu.

Durch die Definition von Plan-Größen, wie Liefertermine, Lieferintervalle, Liefermengen, Bestandsmengen, Verbrauchsmengen je Zeiteinheit und weiterer relevanter Größen im Vorhinein sowie durch die vom System automatisierte Erfassung der Ist-Größen unterstützt und erleichtert das System die Durchführung von Plan-Ist-Vergleichen. Auftretende Abweichungen innerhalb der Plan-Ist-Vergleiche können den jeweils Prozessverantwortlichen automatisiert mitgeteilt werden.

Die Plan-Ist-Vergleiche können neben ihrer Funktion als Regel- und Steuerungselement auch zur automatisierten Materialbestellung genutzt werden, wenn vordefinierte Bestandsmengen in einem Bereich unterschritten werden. Das Erkennen einer leeren Palette kann neben der Bestellung einer neuen Palette ebenso das Abholen der leeren Palette initiieren. Darüber hinaus erlaubt das entwickelte System durch die übertragenen Daten Abweichungen und Störungen frühzeitig zu erkennen, Prozessverantwortliche zu informieren und entsprechende

⁶⁴⁷ In Anlehnung an Burmeister (2019): Durchführung einer Laborstudie zur Lokalisierung von Baustoffen mittels sensorgestützter IoT-Technologie, S. 82

Maßnahmen zu ergreifen. Als Beispiele für eine solche Abweichung oder Störung sei die Lieferung einer Palette in den falschen Taktbereich oder das Vorhandensein von zwei Paletten von unterschiedlichen Gewerken in einem identischen Taktbereich genannt.

Die für den geschilderten Systemeinsatz nötigen grafischen Benutzeroberflächen werden im Zuge des Anwendungsfalls „Intelligenter Materialfluss“ dargestellt.

Systembewertung

Das Ziel des vorliegenden Anwendungsfalls ist die sensorische Erfassung der raumbezogenen Position im Innenbereich und des aktuellen Gewichts der Palette. Das geschilderte und entwickelte System erfüllt diese Ziele und verbessert somit die analysierten Schwachstellen hinsichtlich der Baustellenversorgung. Darüber hinaus unterstützt das System diesbezüglich das dargelegte übergeordnete Ziel des Bauprozessmanagements in Echtzeit.

Da bei dem vorliegenden Anwendungsfall planmäßig nicht alle in Kapitel 4.2.2.1 definierten Ereignisse respektive Prozessindikatoren erfasst werden, erfolgt eine Systembewertung im Gesamtzusammenhang des Anwendungsfalls „Intelligenter Materialfluss“. Im Kontext dieses Anwendungsfalls wird auf Erkenntnisse des vorliegenden Anwendungsfalls zurückgegriffen respektive wird der vorliegende Anwendungsfall erweitert und ergänzt. Eine zielführende und ganzheitliche Systembewertung ist daher erst im o. g. Gesamtzusammenhang sinnvoll.

4.2.5.2 Anwendungsfall „Intelligentes Bauteil“

Der Anwendungsfall „Intelligentes Bauteil“ beinhaltet die sensorische Erfassung des Einbauzeitpunkts eines Bauteils anhand dessen Neigungsänderung während des Einbaus. Im Folgenden werden für diesen Anwendungsfall der Untersuchungsinhalt, die Systemumsetzung sowie der Systemeinsatz und die Systembewertung erläutert.

Untersuchungsinhalt

Die Untersuchungen zum Anwendungsfall „Intelligentes Bauteil“ erfolgen als Feldversuche auf einer Hochhausbaustelle in Frankfurt am Main während der Erstellung der Baugrube und der Untergeschosse in Deckelbauweise. Die sensorische Erfassung des Einbauzeitpunkts wird beim Einbau von Bewehrungskörben für Schlitzwandsegmente sowie beim Einbau der Primärstützen beprobt, dokumentiert und ausgewertet. Zur Erfassung des Einbauzeitpunkts werden die Bauteile mit Sensoren zur Neigungsmessung ausgestattet und referenziert. Die Einbindung der Sensoren in das beschriebene System sowie anwendungsfallsspezifische Aspekte im Kontext der Systemumsetzung, dem Systemeinsatz und der Systembewertung werden im weiteren Verlauf dieses Kapitels dargelegt.

Systemumsetzung

Die Systemkomponenten der Datenerfassung, -übertragung, -strukturierung, -aufbereitung und -auswertung entsprechen grundsätzlich denen des geschilderten Anwendungsfalls in Kapitel 4.2.5.1.

Beim vorliegenden Anwendungsfall beinhaltet die sensorische Datenerfassung die Feststellung einer Neigungsänderung eines Bauteils. Die Neigungsänderung wird durch die in Abbildung 53 dargestellten Beacons erfasst und über die Funktechnologie LoRa in Verbindung mit BLE übertragen. In dem Beacon ist ein Sensor zur Messung der Beschleunigung integriert. Durch diese Beschleunigungsmessung sind Rückschlüsse auf die Neigung des Beacons möglich. Des Weiteren überträgt der Beacon die erfassten Daten über BLE an die Bridge.

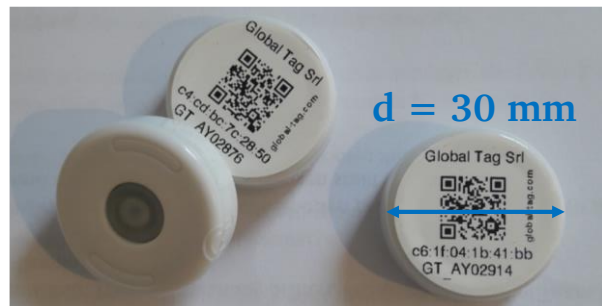


Abbildung 53: Sensoren „Intelligentes Bauteil“⁶⁴⁸

Zur Bestimmung der Neigung werden die entsprechenden Bauteile mit einem Beacon ausgestattet und referenziert. Die Neigungssensoren der Bewehrungskörbe sind mit Draht an dem Bauteil befestigt. Die Neigungssensoren der Primärstützen sind mit Gewebeklebeband an dem Bauteil befestigt. Beide Befestigungsarten sind in nachfolgender Abbildung visualisiert.



Abbildung 54: Befestigung der Beacons – Bewehrungskorb (links) und Primärstütze (rechts)⁶⁴⁹

⁶⁴⁸ Eigene Darstellung

⁶⁴⁹ Eigene Darstellung

Im Gegensatz zum Anwendungsfall „Intelligente Palette“ ist die Bridge beim vorliegenden Anwendungsfall nicht fest verbaut, sondern tragbar. Um eine ständige Funkverbindung zwischen der Bridge und den Beacons zu garantieren, ist die Bridge durch die Versuchsbeobachtenden stets in der Nähe des aktuell relevanten Prozesses bereitzustellen. Aus externen Gründen ist eine feste und dauerhafte Installation innerhalb der eingesetzten Hebezeuge, sodass sich die Bridge stets in der Nähe des aktuellen Prozesses und somit des relevanten Beacons befindet, nicht möglich. Der maximal mögliche Abstand zwischen der Bridge und den Beacons ist abhängig von der Funkreichweite der Beacons. Bei einer Installation innerhalb der eingesetzten Hebezeuge ist der maximale Abstand stets unterschritten. Bei der Bridge, die als zusätzlicher Netzwerkknoten dient und die von den Beacons über BLE versendeten Daten empfängt, handelt es sich wie beim Anwendungsfall „Intelligente Palette“ um einen Einplatinencomputer, der mit einem LoRa-Funkmodul sowie einem Akku zur Energieversorgung ausgestattet ist. Die Bridge bündelt die Daten der Neigungsmessungen und übermittelt diese per LoRa an ein Gateway, welches wie beim vorherigen Anwendungsfall für die Datenübertragung zum Netzwerkserver verantwortlich ist. Für die Feldversuche wurde auf dem Dach eines Nachbargebäudes der Baustelle ein Gateway fest installiert. Die mobile Bridge sowie das fest installierte Gateway sind in nachfolgender Abbildung dargestellt.

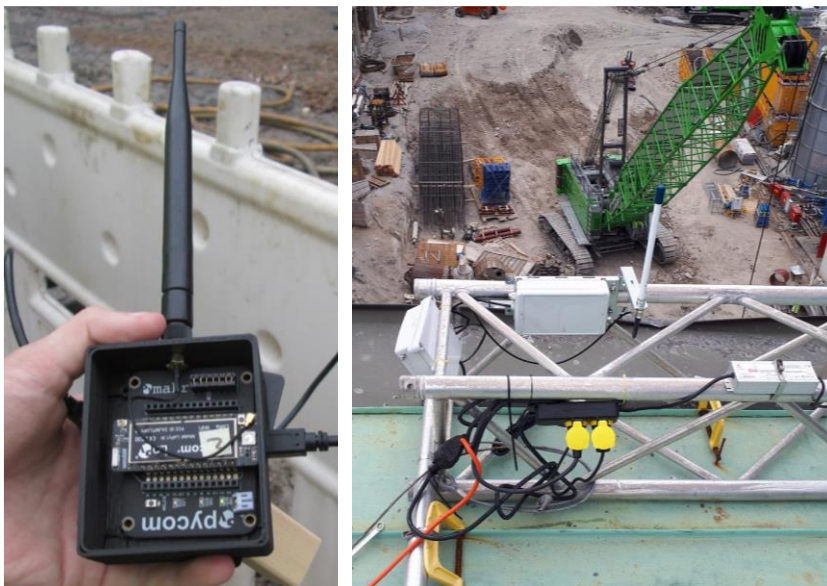


Abbildung 55: Mobile Bridge (links) und Gateway Baustelle (rechts)⁶⁵⁰

Die Datenstrukturierung erfolgt wie bei dem vorherigen Anwendungsfall auf einem Netzwerkserver, der die Daten dem jeweiligen Anwendungsserver zuordnet und entsprechend übermittelt.

Die Datenaufbereitung sowie die Datenauswertung und somit die Datenverarbeitung erfolgen ebenfalls wie bei dem vorherigen Anwendungsfall auf einem Anwendungsserver. Die

⁶⁵⁰ Eigene Darstellung

Darstellung der Daten kann, wie in Abbildung 56 gezeigt, in Tabellenform oder als Diagramm erfolgen. Darüber hinaus ist auch eine Integration und Darstellung der Daten in einem Bauwerksmodell respektive digitalem Zwilling möglich.

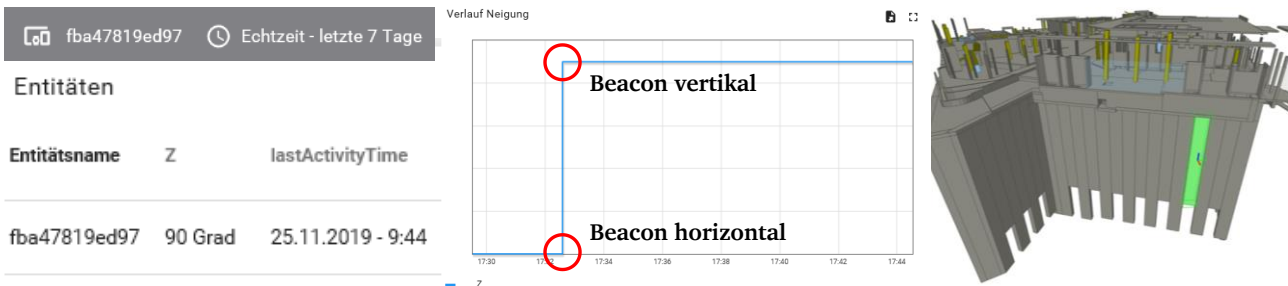


Abbildung 56: Informationsdarstellung „Intelligentes Bauteil“⁶⁵¹

Die Tabelle in Abbildung 56 links zeigt beispielhaft die Darstellung der Daten in Tabellenform für eine einzelne Datenerfassung. Der Entitätsname entspricht der ID des Beacons, die mit einem Bauteil referenziert ist. In der nächsten Spalte ist die Neigung des Beacons ersichtlich. In der letzten Spalte wird der Zeitpunkt der letzten Aktivität des Sensors protokolliert. Die Darstellung über das Diagramm ist so voreingestellt, dass lediglich relevante Änderungen der Neigung im zeitlichen Verlauf abgebildet werden. Bei einer Neigungsänderung des Beacons um 90 Grad zeigt das Diagramm einen Sprung. In Abbildung 56 ist rechts beispielhaft die Visualisierung der Daten in einem Bauwerksmodell respektive einem digitalen Zwilling gezeigt. Bei dem grün markierten Schlitzwandsegment ist der Bewehrungskorb eingebaut, da der zu diesem Bewehrungskorb referenzierte Beacon seine Neigung um 90 Grad verändert hat.

Systemeinsatz

Der Systemeinsatz wird durch Feldversuche auf einer Hochhausbaustelle in Frankfurt am Main beprobt und dokumentiert. Hierzu erfolgen zum einen Versuche durch den Verfasser dieser Arbeit beim Einbau der Bewehrungskörbe sowie zum anderen im Rahmen einer Masterthesis⁶⁵² beim Einbau der Primärstützen. Der Fokus der Feldversuche besteht in der Validierung des entwickelten Systems in einer unmittelbaren Baustellenumgebung. Zur Erprobung und Beurteilung des entwickelten Systems werden die Bauteile vor ihrem Einbau mit Sensoren ausgestattet sowie der anschließende Einbauprozess beobachtet und dokumentiert. Diese Versuchsdurchführung ermöglicht es, Aussagen zu den intendierten Funktionalitäten des entwickelten Systems zu treffen.

Die Erfassung des Einbauzeitpunkts basiert auf dem bereits erläuterten ereignisbasierten Ansatz der Bauprozessidentifikation. Dafür wird beim vorliegenden Anwendungsfall auf Basis

⁶⁵¹ Eigene Darstellung

⁶⁵² Vgl. Kaya (2020): Durchführung einer Baustellenstudie zum sensorgestützten Supply-Chain-Management im Bauwesen

des Arbeitsablaufs innerhalb der beobachteten Arbeitssysteme als Prozessindikator die Neigungsänderung eines Bauteils definiert. Dieser Prozessindikator ist für das intendierte Ziel des Anwendungsfalls zielführend, da die betrachteten Bauteile auf der Baustelle bis zu ihrem Einbau horizontal lagern und erst unmittelbar vor dem Einbau vertikal aufgerichtet werden. Der vorliegende Anwendungsfall greift somit auf einen, der im Rahmen der funktionalen Systemanforderung in Kapitel 4.2.2.1 beschriebenen sowie in Abbildung 40 und Tabelle 7 dargestellten Prozessindikatoren zurück und überprüft dessen Eignung im Kontext der ereignisbasierten Bauprozessidentifikation. Der vorliegende Anwendungsfall soll, ebenso wie der bereits beschriebene sowie der noch folgende Anwendungsfall, die aktive Steuerung und Regelung von Bauproduktionsprozessen unterstützen. Hierzu ist der Bauprozessstatus zunächst über die o. g. Prozessindikatoren zu identifizieren, um darauf aufbauend den Bauprozess mit Hilfe von Plan-Soll-Ist-Vergleichen zu bewerten. Abschließend können Verbesserungen innerhalb des Bauprozesses initiiert werden. Darüber hinaus vereinfacht das entwickelte System die Dokumentation sowie die Kommunikation zwischen den Prozessbeteiligten hinsichtlich des Bauteileinbaus.

Tabelle 8: Ergebnisse Baustellenstudie „Intelligentes Bauteil“⁶⁵³

ID Beacon	Stütztyp	Pfahlnummer	Datum	Realer Einbauzeitpunkt	Sensorisch erfasster Einbauzeitpunkt (Neigungsänderung Beacon)	Anmerkungen
c32a11f8a9e3	728	P728	18.02.2020	14:53:00	15:20:00	Abweichung 27 Minuten
e881db6ae5ed	1.19a	P427	20.02.2020	18:44:00	18:50:00	Abweichung 6 Minuten
d9b86f6e9cca	6.13	P322	10.02.2020	18:15:00	-	Bridge zu weit entfernt
e7b347066faf	9.4	P178	17.02.2020	14:11:00	-	Bridge zu weit entfernt
f0dd1220d802	5.2	P111	25.02.2020	17:03:00	17:05:00	Abweichung 2 Minuten
f32382d0d0f9	803	P803	21.02.2020	14:51:00	14:55:00	Abweichung 4 Minuten
fb6cd49eb37e	6.6	P307	14.02.2020	08:00:00	-	Bridge zu weit entfernt
ff44fc5a1e3e	9.5	P310	18.02.2020	17:04:00	-	Bridge zu weit entfernt
e22a1d706c10	6.4	P305	21.02.2020	13:21:00	13:30:00	Abweichung 9 Minuten
c6a7dd683fd0	1.58	P249	26.02.2020	16:19:00	16:20:00	Abweichung 1 Minute
c7c08488c2ed	6.7	P311	26.02.2020	10:49:00	10:55:00	Abweichung 6 Minuten

Tabelle 8 zeigt die Ergebnisse der Feldversuche beim Einbau der Primärstützen. Es ist festzustellen, dass der erfasste und übertragene Einbauzeitpunkt der Primärstütze dem realen Einbauzeitpunkt entspricht. Beim Abgleich zwischen dem erfassten und dem realen Einbauzeitpunkt konnten teilweise Abweichungen im Minutenbereich festgestellt werden. Diese Abweichungen sind auf die Datenübertragung der Sensoren, die zu festgelegten Intervallen durchgeführt wird, zurückzuführen und beeinflussen auf Grund der Geringfügigkeit nicht die grundsätzliche Funktionalität des entwickelten Systems. In den Fällen bei denen die sensorische Erfassung des Einbauzeitpunkts nicht erfolgreich war, befand sich die Bridge mehr als 60 m von den Beacons entfernt und es konnte somit keine BLE-Verbindung sowie daher auch

⁶⁵³ In Anlehnung an Kaya (2020): Durchführung einer Baustellenstudie zum sensorgestützten Supply-Chain-Management im Bauwesen, S. 73 weiterentwickelt

keine Datenübertragung zwischen Beacon und Bridge realisiert werden. Weiterführende Untersuchungen im Rahmen der Masterthesis⁶⁵⁴ zeigen eine durchweg gesicherte Verbindung und erfolgreiche Datenübertragung zwischen Beacons und Bridge bei einem Abstand von 10 m. Dieser zu empfehlende Abstand ist bei der beschriebenen Installation der Bridge innerhalb der eingesetzten Hebezeuge stets gewährleistet. Die nachfolgende Abbildung zeigt abschließend die Visualisierung des Prozessstatus von zwei Bauteilen anhand der Lage respektive der Neigung des Beacons.

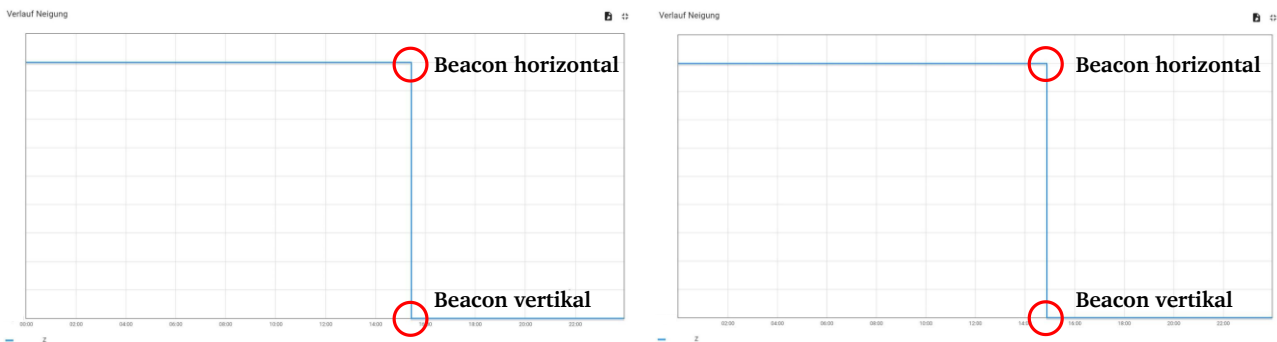


Abbildung 57: Visualisierung Prozessstatus „Intelligentes Bauteil“ – Beacon c32a11f8a9e3 (links) und Beacon f32382d0d0f9 (rechts)⁶⁵⁵

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass das entwickelte System den Prozessstatus „Bauteil nicht eingebaut“ (Beacon/Bauteil in horizontaler Lage), „Bauteil im Einbauprozess“ (Beacon/Bauteil in vertikaler Lage) und „Bauteil eingebaut“ identifizieren, dokumentieren und wie in Abbildung 57 dargestellt, entsprechend visualisieren kann. Auf die Möglichkeit der Datenintegration und somit der Prozessdokumentation sowie der Prozessstatusvisualisierung in einem Bauwerksmodell wurde bereits hingewiesen. Durch die Identifikation des Prozessstatus sowie die automatisierte Erfassung von Ist-Größen unterstützt das entwickelte System die o. g. aktive Steuerung und Regelung des Bauproduktionsprozesses und liefert Input-Parameter für die Bauprozessbewertung und -beurteilung. Als konkretes Beispiel seien exemplarisch Plan-Soll-Ist-Vergleiche hinsichtlich des Einbauzeitpunkts genannt. Darüber hinaus kann die Identifikation des Prozessstatus und daraus resultierende Informationen auch für die Bauprozesssteuerung von nachfolgenden oder bauleistungsprozessen genutzt und den jeweils Prozessverantwortlichen automatisiert mitgeteilt werden.

Durch eine Fusion des vorliegenden Anwendungsfalls mit dem Anwendungsfall respektive der Sensorik der „Intelligenten Palette“ ist neben der Identifikation des Einbauzeitpunkts auch eine Ortung der Bauteile auf der Baustelle möglich. Diese Fusion sowie die, für den

⁶⁵⁴ Vgl. Kaya (2020): Durchführung einer Baustellenstudie zum sensorgestützten Supply-Chain-Management im Bauwesen, S. 74

⁶⁵⁵ In Anlehnung an Kaya (2020): Durchführung einer Baustellenstudie zum sensorgestützten Supply-Chain-Management im Bauwesen, S. ix f. weiterentwickelt

Systemeinsatz nötigen, grafischen Benutzeroberflächen werden im folgenden Kapitel im Zuge des Anwendungsfalls „Intelligenter Materialfluss“ thematisiert.

Systembewertung

Das Ziel des vorliegenden Anwendungsfalls ist die sensorische Erfassung des Einbaupunkts eines Bauteils. Das geschilderte und entwickelte System erfüllt dieses Ziel und liefert einen Beitrag zum Bauprozessmanagement in Echtzeit.

Da beim vorliegenden Anwendungsfall planmäßig nicht alle in Kapitel 4.2.2.1 definierten Ereignisse respektive Prozessindikatoren erfasst werden, erfolgt, wie beim Anwendungsfall „Intelligente Palette“ eine Systembewertung im Gesamtzusammenhang des Anwendungsfalls „Intelligenter Materialfluss“. Im Kontext dieses Anwendungsfalls wird auf Erkenntnisse des vorliegenden Anwendungsfalls zurückgegriffen respektive wird der vorliegende Anwendungsfall erweitert und ergänzt. Eine zielführende und ganzheitliche Systembewertung ist daher erst im o. g. Gesamtzusammenhang sinnvoll.

4.2.5.3 Anwendungsfall „Intelligenter Materialfluss“

Der Anwendungsfall „Intelligenter Materialfluss“ stellt eine Verknüpfung sowie eine Erweiterung der beiden zuvor beschriebenen Anwendungsfälle dar. Die Erweiterung basiert schwerpunktmäßig auf einer Weiterentwicklung hinsichtlich der Positionsbestimmung per BLE sowie auf einer Integration des globalen Positionsbestimmungssystems GPS.

Im Rahmen des Anwendungsfalls „Intelligenter Materialfluss“ sollen mit Ausnahme des Prozessindikators Gewicht alle in Kapitel 4.2.2.1 definierten Ereignisse betrachtet werden. Hierzu sind auf Grundlage der beiden Prozessketten in Kapitel 4.2.2.1 das komplexe Ereignis „Baustellenversorgung über ein Warenverteilzentrum“ sowie für eine, dem Bauproduktionsprozess vorgelagerte und gemäß dem Supply-Chain-Management zu integrierende, stationäre Produktionsstätte, exemplarisch das komplexe Ereignis „Baustellenversorgung von Stahlbetonfertigteilstützen“, zu definieren. Das komplexe Ereignis „Baustellenversorgung von Stahlbetonfertigteilstützen“ veranschaulicht darüber hinaus Baustellenversorgungsprozesse, die für das System Warenverteilzentrum ungeeignet sind. Durch die komplexen Ereignisse werden die entsprechenden Prozesse beschrieben und können polysensorial erfasst werden.

Der Anwendungsfall „Intelligenter Materialfluss“ zielt somit darauf ab, am Beispiel eines auf Paletten gelagerten Materials anhand des komplexen Ereignisses „Baustellenversorgung über ein Warenverteilzentrum“, die folgenden Zustände sensorisch zu erfassen:

- Material auf Palette innerhalb des Wareneingangs,
- Material auf Palette innerhalb der Lagerfläche,
- Material auf Palette in Kommissionierung,
- Material auf Palette innerhalb des Warenausgangs,
- Material auf Palette unterwegs zur Baustelle,
- Material auf Palette auf der Baustelle,
- Material auf Palette am Arbeitsplatz,
- Material verbaut.

Durch das komplexe Ereignis „Baustellenversorgung von Stahlbetonfertigteilstützen“ soll innerhalb des vorliegenden Anwendungsfalls die sensorische Erfassung der folgenden Zustände validiert werden:

- Bauteil innerhalb des Produktionsausgangs,
- Bauteil produziert – auf Lagerfläche,
- Bauteil innerhalb des Warenausgangs,
- Bauteil unterwegs zur Baustelle,
- Bauteil auf der Baustelle,
- Bauteil eingebaut.

Untersuchungsinhalt

Die Untersuchungen zum vorliegenden Anwendungsfall sollten planmäßig als Baustellenstudie durchgeführt werden. Auf Grund der Covid-19-Pandemie erfolgten anstelle der geplanten Baustellenstudie verschiedene Laborstudien in den privaten Räumlichkeiten des Verfassers dieser Arbeit sowie im Rahmen zweier Masterthesen^{656, 657} in den privaten Räumlichkeiten der Studierenden. Die Laborstudien beinhalten hierbei verschiedene Simulationsfälle, die eine Beprobung und Beurteilung der eingesetzten Sensorik bezüglich der Erfassung der o. g.

⁶⁵⁶ Vgl. Gogic (2021): Durchführung einer Baustellenstudie zum sensorgestützten Supply-Chain-Management bei Fertigteilstützen aus Sicht der Baustelle

⁶⁵⁷ Vgl. Tröll (2021): Durchführung einer Baustellenstudie zum sensorgestützten Supply-Chain-Management bei Fertigteilstützen aus der Sicht des Produzenten

Zustände ermöglichen. Die eingesetzten und beprobten Sensoren werden in der folgenden Darstellung zur Systemumsetzung beschrieben.

Systemumsetzung

Wie bei den zuvor geschilderten Anwendungsfällen können die Systemkomponenten nach der Datenerfassung, der Datenübertragung, der Datenstrukturierung sowie der Datenaufbereitung und Datenauswertung differenziert werden.

Zur sensorischen Erfassung der o. g. Zustände ist es nötig, vorab definierte offene Bereiche wie bspw. Lagerflächen oder Warenein- und -ausgänge, im Folgenden als Zonen bezeichnet, automatisiert zu erkennen. Die sensorische Erfassung dieser Zonen erfolgt über mehrere innerhalb dieser Zonen verteilte und fest installierte BLE-Beacons. Die zonenweise Erfassung stellt eine Weiterentwicklung der in Kapitel 4.2.5.1 geschilderten raumweisen Positionsbestimmung per BLE dar. Hierbei soll die zonenweise Positionsbestimmung auch innerhalb offener Bereiche, die im Gegensatz zur raumweisen Positionsbestimmung baulich bspw. nicht durch Trennwände voneinander getrennt sind, zielführende Ergebnisse liefern. Die zonenweise Positionsbestimmung kann darüber hinaus auch zur detaillierteren raumweisen Positionsbestimmung genutzt werden, indem die betreffenden Räume in verschiedene Zonen aufgeteilt und entsprechend mit Beacons ausgestattet werden. Dabei erfordert die genauere, zonenweise Positionsbestimmung ein enges Netz an BLE-Beacons und somit im Vergleich zur raumweisen Positionsbestimmung eine höhere Anzahl an BLE-Beacons. Die verwendeten BLE-Beacons sind in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.



Abbildung 58: Sensoren „Intelligenter Materialfluss“ – BLE-Beacons⁶⁵⁸

Neben den BLE-Beacons werden beim vorliegenden Anwendungsfall Sensoren zur Erfassung der Neigung mit integriertem Mikrocontroller eingesetzt. Dieser Mikrocontroller empfängt neben den Daten der Neigungsmessung auch die Signale respektive die Signalstärken der BLE-Beacons und sendet diese weiter an einen in der Nähe befindlichen WLAN Access Point. Der Mikrocontroller bildet somit bei diesem Anwendungsfall in Verbindung mit dem WLAN Access Point das Gateway. Durch das Anbringen des Neigungssensors respektive des Mikrocontrollers an dem Bauteil oder der Palette ist wie bei dem Anwendungsfall in Kapitel 4.2.5.1

⁶⁵⁸ Eigene Darstellung

das Gateway mobil und die BLE-Beacons immobil.⁶⁵⁹ Anhand der Auswertung der Signalstärken können Rückschlüsse auf die Position des Mikrocontrollers in Bezug zu den BLE-Beacons gezogen werden. Der örtlich am nächst gelegene BLE-Beacon sendet das stärkste Signal zum Mikrocontroller. Die verwendeten Sensoren zur Erfassung der Neigung mit integriertem Mikrocontroller sind in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.



Abbildung 59: Sensoren „Intelligenter Materialfluss“ – Neigungssensor mit integriertem Mikrocontroller⁶⁶⁰

Durch die Verwendung von GPS-Sensoren wird eine Verfolgung des Transportwegs ermöglicht. Hierbei ist es zielführend, das Transportfahrzeug und nicht jedes Bauteil oder jede Palette mit einem GPS-Sensor auszustatten und im Zuge dessen die zu transportierenden Bauteile oder Paletten mit dem Transportfahrzeug respektive dem GPS-Sensor zu referenzieren. Die verwendeten GPS-Sensoren sind in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

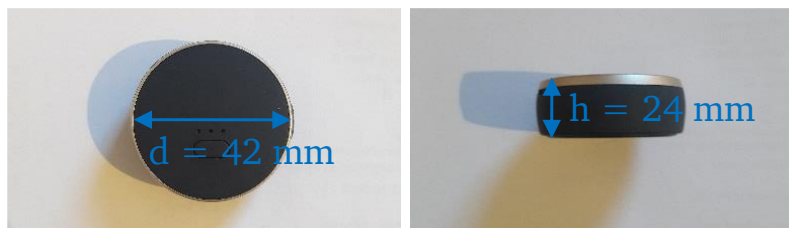


Abbildung 60: Sensoren „Intelligenter Materialfluss“ – GPS-Sensor⁶⁶¹

Die Datenübertragung des BLE-Beacons sowie des Sensors zur Erfassung der Neigung erfolgen bei diesem Anwendungsfall, wie bereits erläutert, über den Mikrocontroller, der in Verbindung mit einem WLAN Access Point das Gateway bildet und die erfassten Daten an einen Server respektive an eine Cloud überträgt. Die Datenstrukturierung sowie die Datenaufbereitung und die Datenauswertung und somit die Datenverarbeitung erfolgen mit Hilfe der cloud- und webbasierten Anwendung Google Sheets. Ein Datenexport und somit eine weiterführende Darstellung und Nutzung der erfassten und gespeicherten Daten bspw. anhand von Dashboards ist prinzipiell möglich, wird aber im Zuge dieser Arbeit nicht praktisch umgesetzt. Durch die Auswirkungen der Covid-19-Pandemie konnte die geplante Einbindung die-

⁶⁵⁹ Vgl. Gogic (2021): Durchführung einer Baustellenstudie zum sensorgestützten Supply-Chain-Management bei Fertigteilstützen aus Sicht der Baustelle, S. 37

⁶⁶⁰ Eigene Darstellung

⁶⁶¹ Eigene Darstellung

ses Anwendungsfalls in die vorhandene Serverstruktur sowie die Nutzung der Funktechnologie LoRa nicht realisiert werden. Die Darstellung der erfassten Daten erfolgt wie in Abbildung 61 gezeigt in Tabellenform.

Date	ESP	Beacon	RSSI	Ax	Ay	Az	Roll	Pitch
21/01/2021 23:09	24:A1:60:53:3C:C0	00:cd:ff:00:21:e9		-41	-0.01	-0.04	1.05	1.94
21/01/2021 23:12	24:A1:60:53:3C:C0	00:cd:ff:0e:5e:61		-45	0	-0.02	1.04	1.13
21/01/2021 23:13	24:A1:60:53:08:60	00:cd:ff:0e:5e:61		-47	-0.01	-0.02	1.08	1.22
21/01/2021 23:15	24:A1:60:53:07:90	00:cd:ff:00:21:e9		-38	0.02	-0.03	1.05	1.72
21/01/2021 23:19	24:A1:60:53:3C:C0	00:cd:ff:0e:5e:62		-75	-0.01	-0.05	1.04	2.72
21/01/2021 23:49	50:02:91:A9:47:20	00:cd:ff:0e:5e:61		-68	-0.01	-0.04	1.07	2.11
21/01/2021 23:49	24:A1:60:53:C0:A8	00:cd:ff:00:21:e9		-26	0	0	1.05	-0.25
22/01/2021 00:02	24:A1:60:53:3C:C0	00:cd:ff:00:21:e9		-55	-0.01	-0.01	1.04	0.42

Abbildung 61: Informationsdarstellung I „Intelligenter Materialfluss“ – BLE-Beacons und Neigungssensoren⁶⁶²

Jede Zeile der Tabelle entspricht einer einzelnen Datenerfassung. Die einzelnen Spalten geben dabei die jeweils übertragenen Daten wieder. Die erste Spalte protokolliert das Datum und die Uhrzeit des Datenempfangs. Die Spalte ESP dient zur eindeutigen Identifikation des Mikrocontrollers respektive des Sensors zur Erfassung der Neigung. Die beiden nächsten Spalten beinhalten den Beacon mit der höchsten empfangenen Signalstärke und geben den dazugehörigen RSSI-Wert an. In den weiteren Spalten werden die gemessenen geradlinigen Bewegungen respektive die Beschleunigungen in der x-, y- und z-Achse angegeben, welche Rückschlüsse über die Neigung ermöglichen. Da neben dem Beschleunigungssensor innerhalb des verwendeten Sensors auch ein Gyroskop verbaut und aktiv ist, werden in den letzten beiden Spalten auch Werte zum Rollwinkel (Bewegungen um die Längsachse) und Nickwinkel (Bewegungen um die Querachse) des Sensors in Grad angegeben.⁶⁶³ In Abbildung 62 sind weitere übertragene Daten dargestellt.

beacons	BAT	Voltage	wifi_rssi
00:cd:ff:00:21:e9,-41;00:cd:ff:0e:5e:61,-57;00:cd:ff:0e:5e:62,-59;00:cd:ff:0e:5e:63,-56;00:cd:ff:0e:5e:7a,-68;	96.2	4.03	-68
00:cd:ff:00:21:e9,-58;00:cd:ff:0e:5e:61,-45;00:cd:ff:0e:5e:62,-59;00:cd:ff:0e:5e:63,-55;00:cd:ff:0e:5e:7a,-63;	98.66	4.06	-65
00:cd:ff:00:21:e9,-54;00:cd:ff:0e:5e:61,-47;00:cd:ff:0e:5e:62,-58;00:cd:ff:0e:5e:63,-60;00:cd:ff:0e:5e:7a,-60;	97.64	4.04	-57
00:cd:ff:00:21:e9,-38;00:cd:ff:0e:5e:61,-38;00:cd:ff:0e:5e:62,-60;00:cd:ff:0e:5e:63,-56;00:cd:ff:0e:5e:7a,-64;	99.38	4.06	-61
00:cd:ff:00:21:e9,-76;00:cd:ff:0e:5e:61,-78;00:cd:ff:0e:5e:62,-75;00:cd:ff:0e:5e:63,-78;00:cd:ff:0e:5e:7a,-77;	97.84	4.05	-55
00:cd:ff:00:21:e9,-74;00:cd:ff:0e:5e:61,-68;00:cd:ff:0e:5e:62,-76;00:cd:ff:0e:5e:63,-75;00:cd:ff:0e:5e:7a,-70;	98.46	4.05	-59
00:cd:ff:00:21:e9,-26;00:cd:ff:0e:5e:61,-73;00:cd:ff:0e:5e:62,-74;00:cd:ff:0e:5e:63,-74;00:cd:ff:0e:5e:7a,-76;	91.98	3.98	-54
00:cd:ff:00:21:e9,-55;00:cd:ff:0e:5e:61,-87;00:cd:ff:0e:5e:62,-79;00:cd:ff:0e:5e:63,-80;00:cd:ff:0e:5e:7a,-84;	100.41	4.07	-60

Abbildung 62: Informationsdarstellung II „Intelligenter Materialfluss“ – BLE-Beacons und Neigungssensoren⁶⁶⁴

⁶⁶² In Anlehnung an Gogic (2021): Durchführung einer Baustellenstudie zum sensorgestützten Supply-Chain-Management bei Fertigteilstützen aus Sicht der Baustelle, S. 42

⁶⁶³ Vgl. Gogic (2021): Durchführung einer Baustellenstudie zum sensorgestützten Supply-Chain-Management bei Fertigteilstützen aus Sicht der Baustelle, S. 41 f.

⁶⁶⁴ In Anlehnung an Gogic (2021): Durchführung einer Baustellenstudie zum sensorgestützten Supply-Chain-Management bei Fertigteilstützen aus Sicht der Baustelle, S. 42

Die erste Spalte beinhaltet zusammengefasst die weiteren erkannten Beacons mit der jeweils empfangenen Signalstärke. Darüber hinaus werden Werte zum Batteriestatus des Mikrocontrollers respektive des Sensors zur Erfassung der Neigung sowie zur Signalstärke des WLAN Access Points übertragen und visualisiert.⁶⁶⁵

Die Datenübertragung des GPS-Sensors erfolgt mit Hilfe einer integrierten SIM-Karte über das Mobilfunknetz und ermöglicht der zur Nutzung des verwendeten GPS-Sensors benötigten App des Mobilfunkherstellers, auf die erfassten Daten des GPS-Sensors zuzugreifen. Durch die fehlenden offenen Schnittstellen des verwendeten GPS-Sensors respektive der App des Mobilfunkunternehmens und den damit einhergehenden Limitationen konnte der GPS-Sensor nicht in die vorhandene Serverstruktur eingebunden werden. Die Datenstrukturierung sowie die Datenaufbereitung und die Datenauswertung und somit die Datenverarbeitung erfolgen daher innerhalb der App respektive den Servern des Mobilfunkunternehmens und können an dieser Stelle nicht näher erläutert werden. Alternative GPS-Sensoren mit offeneren Schnittstellen konnten u. a. auch aus Gründen der Auswirkungen der Covid-19-Pandemie ebenfalls nicht eingebunden werden.

Die übertragenen Daten lassen sich über eine App des Mobilfunkunternehmens aufrufen. Innerhalb der Benutzeroberfläche kann zwischen einer Kartenansicht, die den aktuellen Standort des GPS-Sensors wiedergibt und einer Listenansicht, die die Historie des Standorts des GPS-Sensors unter Angabe einer Adresse und einer Uhrzeit aufführt, gewählt werden. Darüber hinaus können verschiedene Aktualisierungsintervalle des Standorts des GPS-Sensors eingestellt werden. Hierbei erhöhen kurze Aktualisierungsintervalle die Genauigkeit bei gleichzeitiger Reduzierung der Akkulaufzeit und vice versa. Neben den automatisierten Aktualisierungsintervallen ist eine manuelle Aktualisierung des Standorts des GPS-Sensors möglich. Eine weitere, für den vorliegenden Anwendungsfall relevante Möglichkeit, ist die Definition von Zonen innerhalb der App des Mobilfunkunternehmens. Auf einer Karte kann ein Standort ausgewählt werden, der anschließend seitens der App mit einem Radius von 90 bis 100 m versehen wird. Beim Eintritt des GPS-Sensors in diesen Radius respektive diese Zone löst die App eine automatische Benachrichtigung aus.⁶⁶⁶ Die hier definierten Zonen sind von den im Kontext der zonenweisen Positionsbestimmung definierten Zonen zu differenzieren. Die Zonen auf Basis des GPS-Sensors sind großflächiger und können eingesetzt werden, um den Ein- oder Austritt sowie den Aufenthalt in den Zonen „Baustelle“, „Warenverteilzentrum“ oder „Stationäre Produktionsstätte“ zu erfassen. Dem gegenüber stehen die kleinflächigeren Zonen der zonenweisen Positionsbestimmung, die es ermöglichen sollen, Positionen innerhalb von Lager- und Kommissionierflächen, Warenein- und -ausgängen oder Arbeits- und

⁶⁶⁵ Vgl. Gogic (2021): Durchführung einer Baustellenstudie zum sensorgestützten Supply-Chain-Management bei Fertigteilstützen aus Sicht der Baustelle, S. 43

⁶⁶⁶ Vgl. Gogic (2021): Durchführung einer Baustellenstudie zum sensorgestützten Supply-Chain-Management bei Fertigteilstützen aus Sicht der Baustelle, S. 43

Taktbereichen zu erfassen. Die nachfolgende Abbildung zeigt die beschriebenen Benutzeroberflächen der App.

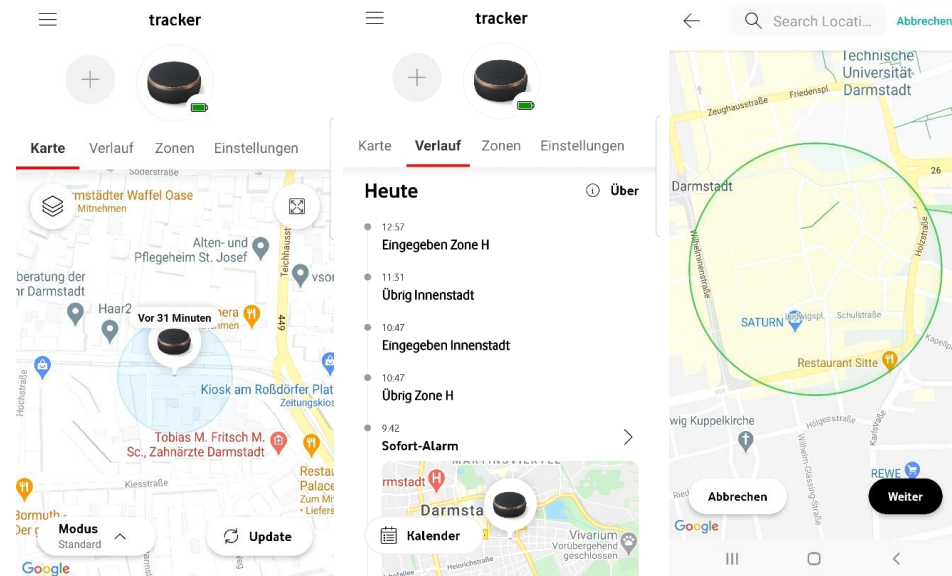


Abbildung 63: Informationsdarstellung „Intelligenter Materialfluss“ – GPS-Sensor – Kartenansicht (links), Listenansicht (mittig) und Zonendefinition (rechts)⁶⁶⁷

Systemeinsatz

Die Grundlage für den Systemeinsatz des Anwendungsfalls bilden die beiden genannten komplexen Ereignisse „Baustellenversorgung über ein Warenverteilzentrum“ und „Baustellenversorgung von Stahlbetonfertigteilstützen“. Innerhalb dieser Ereignisse sind verschiedene Zustände sensorisch zu erfassen. Hierzu werden die beiden komplexen Ereignisse auf Basis der beiden Prozessketten in Kapitel 4.2.2.1 anhand der Tabellen 9 und 10 beschrieben.

⁶⁶⁷ In Anlehnung an Tröll (2021): Durchführung einer Baustellenstudie zum sensorgestützten Supply-Chain-Management bei Fertigteilstützen aus der Sicht des Produzenten, S. 84

Tabelle 9: Komplexes Ereignis „Baustellenversorgung über ein Warenverteilzentrum“⁶⁶⁸

Vorgang	Beschreibung des Ereignisses
<i>Material auf Palette zum Warenverteilzentrum liefern</i>	Transportfahrzeug „Lieferant“ verlässt GPS-Zone „Lieferant“.
<i>Material auf Palette im Warenverteilzentrum entgegennehmen</i>	Transportfahrzeug „Lieferant“ tritt in GPS-Zone „Warenverteilzentrum“ ein. Palette tritt in BLE-Zone „Wareneingang Warenverteilzentrum“ ein.
Material auf Palette im Warenverteilzentrum lagern	Palette verlässt BLE-Zone „Wareneingang Warenverteilzentrum“ und tritt in BLE-Zone „Lagerfläche Warenverteilzentrum“ ein.
Material auf Palette im Warenverteilzentrum kommissionieren	Palette verlässt BLE-Zone „Lagerfläche Warenverteilzentrum“ und tritt in BLE-Zone „Kommissionierfläche Warenverteilzentrum“ ein. Gewichtsabnahme der homogen beladenen Palette und Gewichtszunahme der zu kommissionierenden Palette.
Material auf Palette für Lieferung vorbereiten	Palette verlässt BLE-Zone „Kommissionierfläche Warenverteilzentrum“ und tritt in BLE-Zone „Warenausgang Warenverteilzentrum“ ein.
Material auf Palette zur Baustelle liefern	Palette verlässt BLE-Zone „Warenausgang Warenverteilzentrum“. Transportfahrzeug „Warenverteilzentrum“ verlässt GPS-Zone „Warenverteilzentrum“.
Material auf Palette auf Baustelle entgegennehmen	Transportfahrzeug „Warenverteilzentrum“ tritt in GPS-Zone „Baustelle“ ein. Palette tritt in BLE-Zone „Anlieferungsfläche Baustelle“ ein.
Material auf Palette am Arbeitsplatz bereitstellen	Palette verlässt BLE-Zone „Anlieferungsfläche Baustelle“ und tritt in BLE-Zone „Arbeitsplatz“ ein.
Material verbauen	Gewichtsabnahme der Palette innerhalb der BLE-Zone „Arbeitsplatz“.

Die kursiv dargestellten Vorgänge und Ereignisse in der Tabelle erfordern eine Mitwirkung der Beteiligten der vorgelagerten Prozesse hinsichtlich des Anbringens der Sensoren. An dieser Stelle sei angemerkt, dass das komplexe Ereignis „Baustellenversorgung über ein Warenverteilzentrum“ bei einer entsprechenden Infrastruktur sowie einer Nutzung von Sensoren innerhalb der Örtlichkeiten des Lieferanten, des Produzenten oder des Händlers gemäß den beschriebenen Vorgängen innerhalb des Warenverteilzentrums um weitere vorgelagerte Prozesse dieser Beteiligten erweitert werden kann. Die nachfolgende Abbildung visualisiert schematisch das in Tabelle 9 beschriebene komplexe Ereignis.

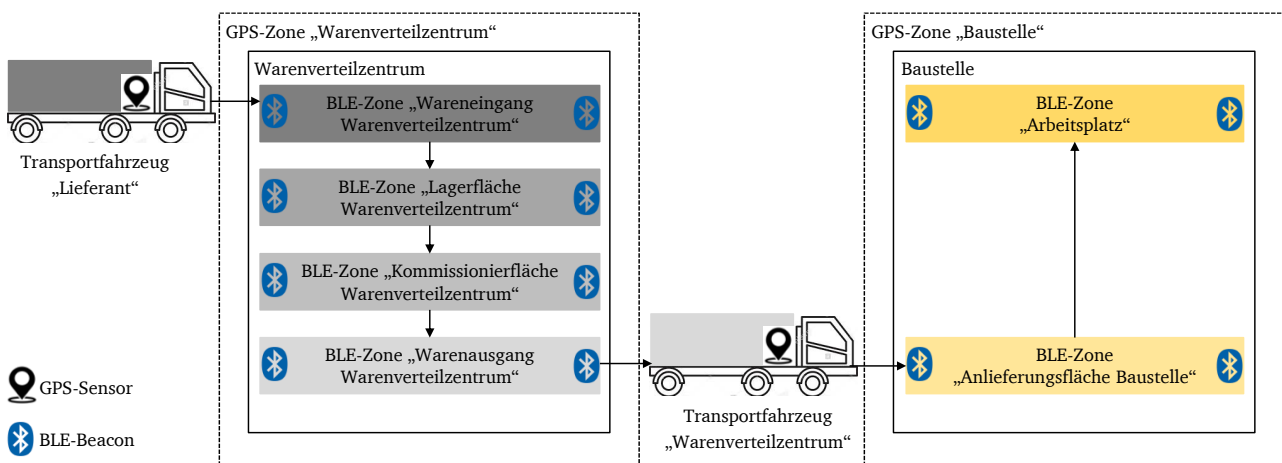
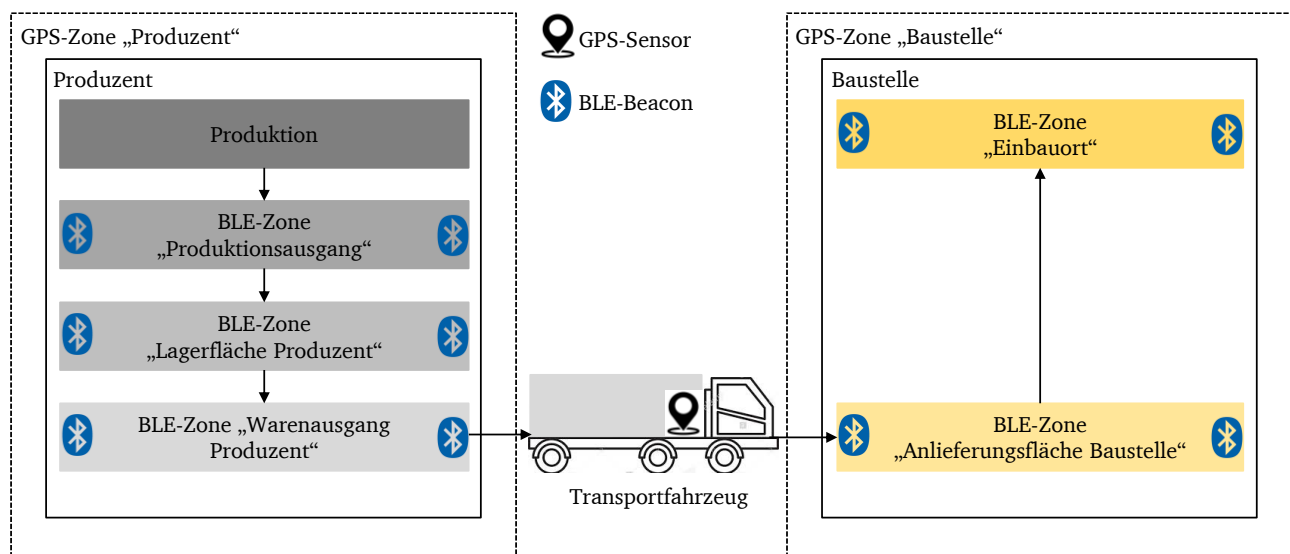
Abbildung 64: Komplexes Ereignis „Baustellenversorgung über ein Warenverteilzentrum“⁶⁶⁹⁶⁶⁸ Eigene Darstellung⁶⁶⁹ Eigene Darstellung

Tabelle 10: Komplexes Ereignis „Baustellenversorgung von Stahlbetonfertigteilstützen“⁶⁷⁰

Vorgang	Beschreibung des Ereignisses
Stahlbetonfertigteilstütze produzieren	Stahlbetonfertigteilstütze tritt in BLE-Zone „Produktionsausgang“ ein.
Stahlbetonfertigteilstütze lagern	Stahlbetonfertigteilstütze verlässt BLE-Zone „Produktionsausgang“ und tritt in BLE-Zone „Lagerfläche Produzent“ ein.
Stahlbetonfertigteilstütze für Lieferung vorbereiten	Stahlbetonfertigteilstütze verlässt BLE-Zone „Lagerfläche Produzent“ und tritt in BLE-Zone „Warenausgang Produzent“ ein.
Stahlbetonfertigteilstütze zur Baustelle liefern	Stahlbetonfertigteilstütze verlässt BLE-Zone „Warenausgang Produzent“. Transportfahrzeug verlässt GPS-Zone „Produzent“.
Stahlbetonfertigteilstütze auf Baustelle entgegennehmen	Transportfahrzeug tritt in GPS-Zone „Baustelle“ ein. Stahlbetonfertigteilstütze tritt in BLE-Zone „Anlieferungsfläche Baustelle“ ein.
Stahlbetonfertigteilstütze am Einbauort bereitstellen	Stahlbetonfertigteilstütze verlässt BLE-Zone „Anlieferungsfläche Baustelle“ und tritt in BLE-Zone „Einbauort“ ein.
Stahlbetonfertigteilstütze einbauen	Neigungsänderung der Stahlbetonfertigteilstütze innerhalb der BLE-Zone „Einbauort“.

Ebenso wie das komplexe Ereignis „Baustellenversorgung über ein Warenverteilzentrum“ erweiterbar ist, lässt sich auch das komplexe Ereignis „Baustellenversorgung von Stahlbetonfertigteilstützen“ durch weitere Vorgänge und Ereignisse ergänzen. Hierzu zählt u. a. die sensorische Erfassung der einzelnen Fertigungsprozesse innerhalb der Produktion im Fertigteilwerk. Da in diesem Kontext andere Sensortypen zum Einsatz kommen und zu diskutieren sind, wird hierauf im weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht näher eingegangen. Das beschriebene komplexe Ereignis erfordert als ersten Schritt das Anbringen der Sensoren an die Stahlbetonfertigteilstütze vor dem Produktionsausgang bspw. im Rahmen der Qualitätskontrolle. Die nachfolgende Abbildung visualisiert schematisch das in Tabelle 10 beschriebene komplexe Ereignis.

Abbildung 65: Komplexes Ereignis „Baustellenversorgung von Stahlbetonfertigteilstützen“⁶⁷¹⁶⁷⁰ Eigene Darstellung⁶⁷¹ Eigene Darstellung

Bei beiden komplexen Ereignissen erfolgt im Zuge der Arbeitsvorbereitung eine eindeutige Zuordnung, welche Palette oder welche Stahlbetonfertigteilstütze zu welchem Zeitpunkt bei welchem Taktbereich, Arbeitsplatz oder Einbauort und dementsprechend in welcher Zone benötigt wird. Die Darstellung dieser raum-zeitlichen Zusammenhänge in Verbindung mit der in den vorherigen Anwendungsfällen beschriebenen Referenzierung zwischen Sensor und Bauteil oder Palette bilden die Grundlage für die in Kapitel 4.2.5.1 thematisierten Plan-Soll-Ist-Vergleiche sowie den daraus resultierenden Maßnahmen und Möglichkeiten des Bauprozessmanagements.

Da die geplante Baustellenstudie, wie bereits erläutert, nicht realisiert werden konnte, erfolgte die Beschreibung des Systemeinsatzes und die damit verbundene Validierung des Anwendungsfalls „Intelligenter Materialfluss“ anhand von definierten Simulationsfällen und deren Ergebnissen. Für die Validierung des Systems respektive des Gewichtssensors wird ergänzend auf die Ergebnisse des Anwendungsfalls aus Kapitel 4.2.5.1 zurückgegriffen.

Der erste Simulationsfall beinhaltet die Validierung des Sensors zur Neigungsmessung. Die Ergebnisse zeigen, dass der Sensor aussagekräftige Informationen über die horizontale oder vertikale Lage des Sensors respektive des Bauteils liefert. Dies bestätigt die Aussagen aus Kapitel 4.2.5.2 zur Eignung des Sensors.^{672, 673}

Simulationen zur Erkennung des nächstgelegenen Beacons zeigen, dass von den nächstgelegenen Beacons bei der überwiegenden Anzahl an Messungen auch das stärkste Signal gesendet sowie vom Mikrocontroller empfangen wird. Hierbei kann es durch Schwankungen der Signalstärken der BLE-Beacons zu Abweichungen kommen.^{674, 675} Auf diese Thematik wird im Kontext der Systembewertung näher eingegangen.

In Kapitel 4.2.5.2 wird für eine sichere Datenübertragung zwischen BLE-Beacon und Mikrocontroller ein Abstand von 10 m empfohlen. Die durchgeführten Messungen zeigen beim vorliegenden Anwendungsfall eine sichere Datenübertragung bei einem Abstand zwischen

⁶⁷² Vgl. Gogic (2021): Durchführung einer Baustellenstudie zum sensorgestützten Supply-Chain-Management bei Fertigteilstützen aus Sicht der Baustelle, S. 62 f.

⁶⁷³ Vgl. Tröll (2021): Durchführung einer Baustellenstudie zum sensorgestützten Supply-Chain-Management bei Fertigteilstützen aus der Sicht des Produzenten, S. 78

⁶⁷⁴ Vgl. Gogic (2021): Durchführung einer Baustellenstudie zum sensorgestützten Supply-Chain-Management bei Fertigteilstützen aus Sicht der Baustelle, S. 63 f.

⁶⁷⁵ Vgl. Tröll (2021): Durchführung einer Baustellenstudie zum sensorgestützten Supply-Chain-Management bei Fertigteilstützen aus der Sicht des Produzenten, S. 79

BLE-Beacon und Mikrocontroller von 20 m.^{676, 677} Dieser Abstand bezieht sich auf den fokussierten Anwendungsbereich des vorliegenden Anwendungsfalls und dementsprechend auf offene Bereiche ohne Hindernisse wie bspw. Stahlbetonwände.

Durch den letzten Simulationsfall wird das Erkennen von vorab definierten Zonen beprobt. Die Untersuchung zeigt, dass grundsätzlich eine Erkennung von vorab definierten Zonen möglich ist. In Korrelation zum Simulationsfall zur Erkennung des nächstgelegenen Beacons sind auch beim Simulationsfall zur Zonenerkennung Schwankungen der Signalstärken der BLE-Beacons zu konstatieren, welche die Messergebnisse verfälschen und somit eine fehlerhafte Zonenerkennung liefern. Der Umstand einer fehlerhaften Zonenerkennung tritt darüber hinaus gehäuft im Bereich von Zonengrenzen auf.^{678, 679} Dieser Aspekt wird ebenso wie die Signalschwankungen im Rahmen der Systembewertung weiterführend thematisiert. Bei den Ergebnissen bezüglich der Erkennung von Zonen ist anzumerken, dass bei den Simulationsfällen auf Grund der örtlichen Gegebenheiten relativ kleinteilige sowie direkt nebeneinander liegende Zonen per BLE-Beacons abgegrenzt wurden und somit viele Bereiche innerhalb von Zonengrenzen vorhanden waren. In der praktischen Umsetzung werden im Vergleich zu den Simulationsfällen großflächigere Zonen benötigt, die darüber hinaus nicht zwangsläufig direkt nebeneinander liegen. Die großflächigeren Zonen und dementsprechend ein größerer Abstand zwischen den verschiedenen BLE-Beacons aus unterschiedlichen Zonen ermöglichen eine zielsicherere Zonenerkennung. Diese ist bei einem Abstand zwischen zwei BLE-Beacons von 15 m festzustellen.⁶⁸⁰ Des Weiteren wird die Einrichtung von Pufferzonen zwischen zwei definierten Zonen empfohlen, um den Effekt der fehlerhaften Zonenerkennungen an Zonengrenzen zu minimieren. Eine weiterführende kritische Würdigung des entwickelten Systems und Konzepts erfolgt im Kontext der Systembewertung.

Die Untersuchungen des GPS-Sensors zeigen bei einer Standortgenauigkeit von 10 bis 15 m, dass die vorab in der App definierten Zonen erkannt werden. Hierzu ist eine Verweildauer des GPS-Sensors respektive des Transportfahrzeugs von 2 bis 3 Minuten innerhalb der definierten Zonen sicherzustellen.^{681, 682} Diese Voraussetzung ist durch Be- und Entladezeiten

⁶⁷⁶ Vgl. Gogic (2021): Durchführung einer Baustellenstudie zum sensorgestützten Supply-Chain-Management bei Fertigteilstützen aus Sicht der Baustelle, S. 65

⁶⁷⁷ Vgl. Tröll (2021): Durchführung einer Baustellenstudie zum sensorgestützten Supply-Chain-Management bei Fertigteilstützen aus der Sicht des Produzenten, S. 74

⁶⁷⁸ Vgl. Gogic (2021): Durchführung einer Baustellenstudie zum sensorgestützten Supply-Chain-Management bei Fertigteilstützen aus Sicht der Baustelle, S. 65 f.

⁶⁷⁹ Vgl. Tröll (2021): Durchführung einer Baustellenstudie zum sensorgestützten Supply-Chain-Management bei Fertigteilstützen aus der Sicht des Produzenten, S. 81 f.

⁶⁸⁰ Vgl. Tröll (2021): Durchführung einer Baustellenstudie zum sensorgestützten Supply-Chain-Management bei Fertigteilstützen aus der Sicht des Produzenten, S. 81

⁶⁸¹ Vgl. Gogic (2021): Durchführung einer Baustellenstudie zum sensorgestützten Supply-Chain-Management bei Fertigteilstützen aus Sicht der Baustelle, S. 67

⁶⁸² Vgl. Tröll (2021): Durchführung einer Baustellenstudie zum sensorgestützten Supply-Chain-Management bei Fertigteilstützen aus der Sicht des Produzenten, S. 86 ff.

oder Wartezeiten des Transportfahrzeugs innerhalb der GPS-Zonen „Warenverteilzentrum“, „Baustelle“ oder „Produzent“ gewährleistet.

Die Ergebnisse der Simulationsfälle sowie die Erkenntnisse zum Gewichtssensor aus Kapitel 4.2.5.1 zeigen, dass durch das entwickelte System die verschiedenen Zustände innerhalb der in den Tabellen 9 und 10 beschriebenen Ereignisse polysensoral erfasst werden können. Der Anwendungsfall „Intelligenter Materialfluss“ respektive das entwickelte System automatisiert und digitalisiert die Erfassung der Materialflüsse und liefert somit einen Beitrag zum Bauprozessmanagement in Echtzeit hinsichtlich der Regelung und Steuerung von Materialflüssen. Auf die im Zuge des Bauprozessmanagements durchzuführenden Plan-Soll-Ist-Vergleiche sowie auf die daraus resultierenden Maßnahmen und Möglichkeiten wie bspw. die Informationsgewinnung zu Materialstandorten, Materialverbräuchen oder Materialeinbauzeitpunkten, wurde bereits in Kapitel 4.2.5.1 eingegangen und wird an dieser Stelle verwiesen.

Für den praktischen Systemeinsatz empfiehlt sich die Nutzung von Dashboards um bspw. die Ergebnisse der o. g. Plan-Soll-Ist-Vergleiche übersichtlich darzustellen. Im Folgenden werden daher zwei Dashboards für den Anwendungsfall „Intelligenter Materialfluss“ vorgestellt. Die Dashboards stellen dabei exemplarische Mock-Ups dar, die die verschiedenen Möglichkeiten der Informationsdarstellung und die unterschiedlichen Funktionen visualisieren sollen. Die entwickelten Benutzeroberflächen zielen auf eine Darstellung auf einem Smartphone, einem Tablet oder einem Laptopbildschirm ab. Für die unterschiedlichen Endgeräte ist es zielführend, spezifische Anpassungen des Layouts vorzunehmen.

Das erste Dashboard ist für die Anwendung im Rahmen des komplexen Ereignisses „Baustellenversorgung über ein Warenverteilzentrum“ konzipiert. Als Anwender des Dashboards werden hauptsächlich Baustellenführungskräfte auf der operativen Managementebene angesprochen. Das Dashboard beinhaltet verschiedene Benutzeroberflächen, die im Folgenden erläutert werden.

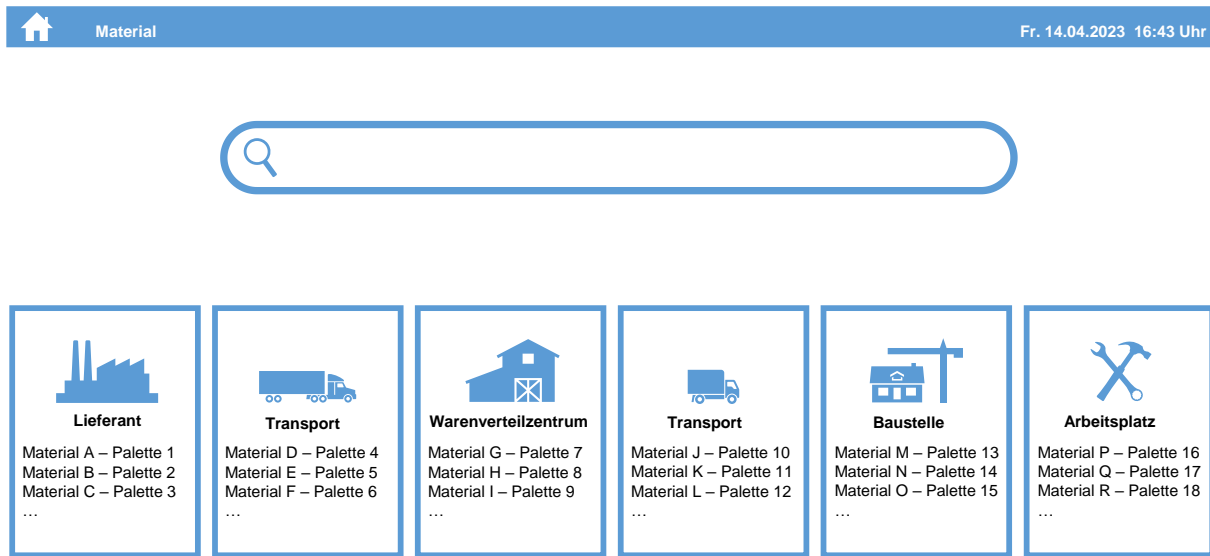


Abbildung 66: Dashboard „Baustellenversorgung über ein Warenverteilzentrum“ – Übersicht⁶⁸³

Die in Abbildung 66 dargestellte Benutzeroberfläche listet alle erfassten Materialien respektive Paletten auf und ordnet diese kontinuierlich ihrem aktuellen Standort zu. Eine weitere Detaillierung des Standorts gemäß dem komplexen Ereignis „Baustellenversorgung über ein Warenverteilzentrum“ kann, wie in Abbildung 67 am Beispiel der Baustelle und der Arbeitsplätze im Erdgeschoss gezeigt, über die Darstellung des Standorts der Palette in einem Grundriss erfolgen. Darüber hinaus ermöglicht die Benutzeroberfläche in Abbildung 67 das Filtern nach bestimmten Paletten oder das Auswählen bestimmter Paletten im Grundriss, um auf die in Abbildung 68 dargestellte Benutzeroberfläche zu gelangen.

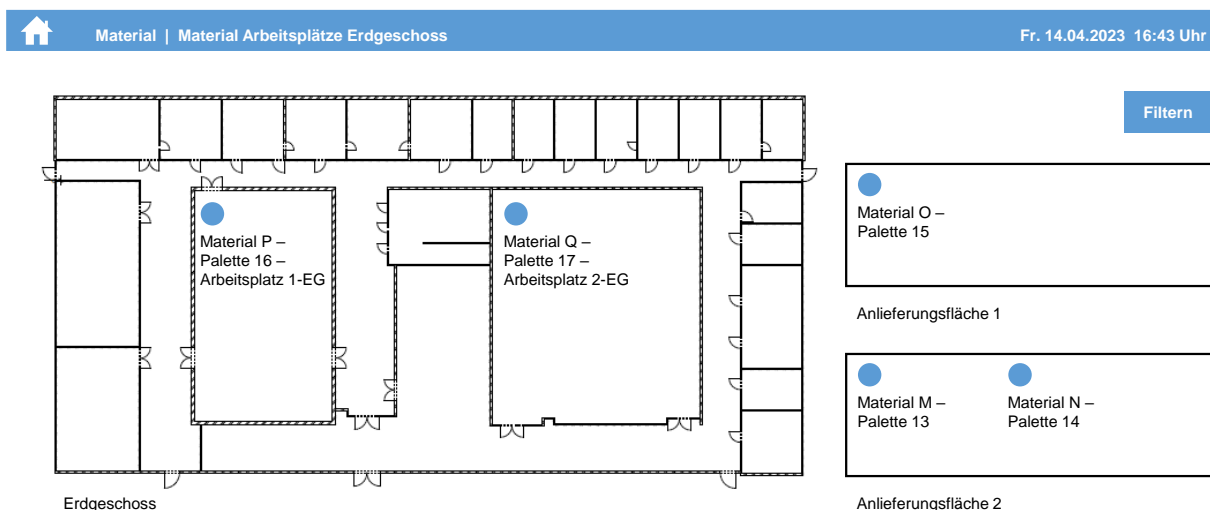


Abbildung 67: Dashboard „Baustellenversorgung über ein Warenverteilzentrum“ – Standort⁶⁸⁴

⁶⁸³ In Anlehnung an Burmeister (2019): Durchführung einer Laborstudie zur Lokalisierung von Baustoffen mittels sensorgestützter IoT-Technologie, S. XXI weiterentwickelt

⁶⁸⁴ In Anlehnung an Burmeister (2019): Durchführung einer Laborstudie zur Lokalisierung von Baustoffen mittels sensorgestützter IoT-Technologie, S. XXI weiterentwickelt

Eine weitere Möglichkeit des Suchens, Filterns und Auswählens von Paletten ist die in Abbildung 66 dargestellte Suchfunktion. Der Anwender des Dashboards kann anhand der ID Informationen zu bestimmten Paletten erhalten oder die Paletten nach speziellen Suchkriterien, wie bspw. Lieferdatum, Lieferant, Standort, Gewerk oder Material filtern. Durch die Auswahl einer speziellen Palette können, wie in Abbildung 68 dargestellt, spezifische Informationen der Palette und des Materials sowie die Ist-Größen hinsichtlich des Materialflusses abgerufen werden. Eine weitere Detaillierung der Information zum Materialfluss, wie zum Beispiel der genaue Standort während des Transports oder innerhalb des Warenverteilzentrums kann, entsprechend Abbildung 67 durch die Verwendung von Grundrissen oder Landkarten erfolgen.

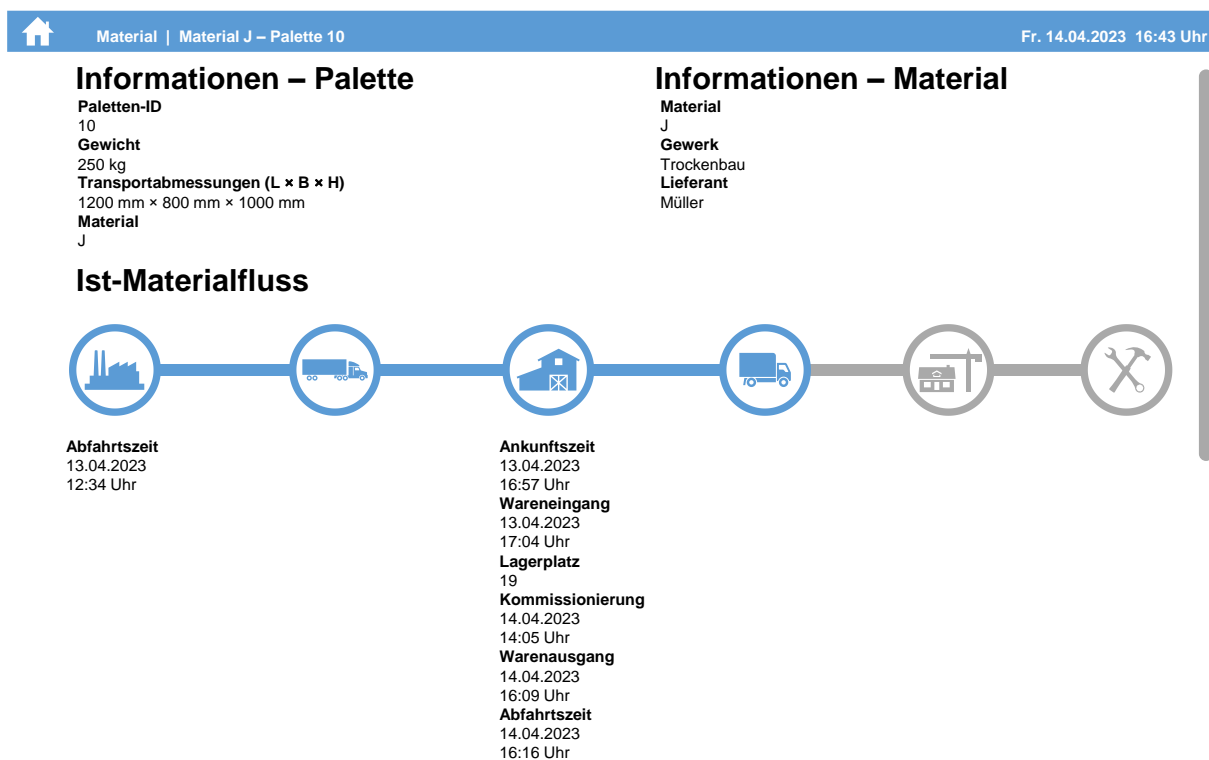


Abbildung 68: Dashboard „Baustellenversorgung über ein Warenverteilzentrum“ – Details⁶⁸⁵

In Abbildung 69 ist die Gegenüberstellung des Ist-Materialflusses mit dem Plan-Materialfluss dargelegt. Hierbei können Abweichung automatisiert erkannt und entsprechend farblich hervorgehoben werden. Des Weiteren ist bei auftretenden Abweichungen eine automatische Alarmierung der Prozessverantwortlichen denkbar.

⁶⁸⁵ In Anlehnung an Burmeister (2019): Durchführung einer Laborstudie zur Lokalisierung von Baustoffen mittels sensorgestützter IoT-Technologie, S. XXII weiterentwickelt

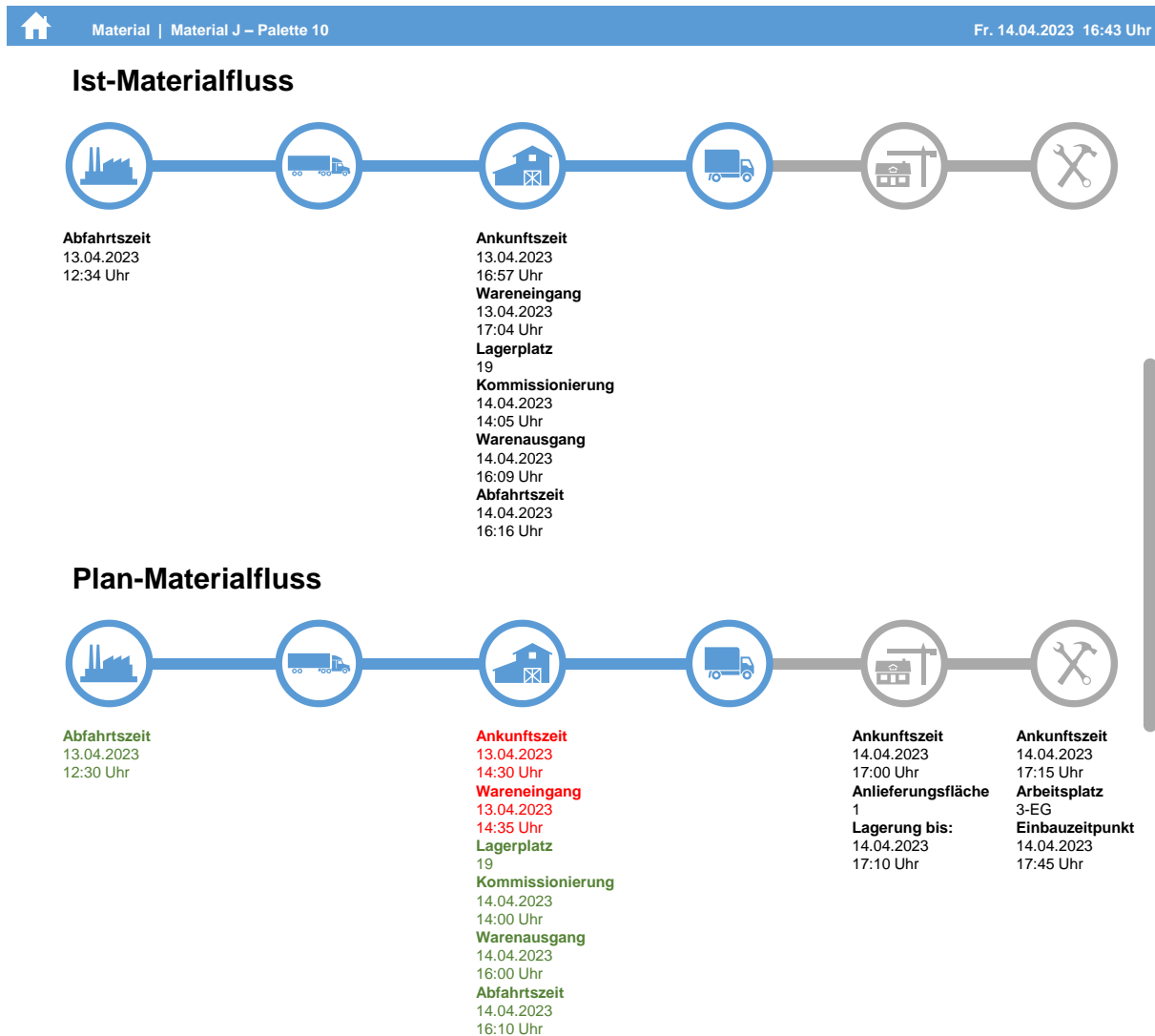


Abbildung 69: Dashboard „Baustellenversorgung über ein Warenverteilzentrum“ –
Gegenüberstellung Ist- und Plan-Materialfluss⁶⁸⁶

Durch die im Zuge des Planungsprozesses respektive der Arbeitsvorbereitung definierten Plan-Größen und den polysensoral erfassten Ist-Größen ergeben sich vielfältige Möglichkeiten einer detaillierten Prozessanalyse. Abbildung 70 zeigt bspw. die Analyse im Bezug zum Einbaufortschritt anhand der Gewichtsänderung der Palette innerhalb des vorgesehenen Arbeitsplatzes. Äquivalent zur dargestellten Benutzeroberfläche in Abbildung 69 können Abweichungen automatisiert erkannt und entsprechend farblich hervorgehoben werden sowie bei auftretenden Abweichungen automatische Alarmierungen an die Prozessverantwortli-

⁶⁸⁶ In Anlehnung an Burmeister (2019): Durchführung einer Laborstudie zur Lokalisierung von Baustoffen mittels sensorgestützter IoT-Technologie, S. XXII weiterentwickelt

chen versendet werden. Die Historie ermöglicht den Zugriff auf die gespeicherten Informationen und Analysen aller Paletten respektive Materialien und kann bspw. als Dokumentation, Datengrundlage einer Nachkalkulation oder als Input für Prognosemodelle genutzt werden.

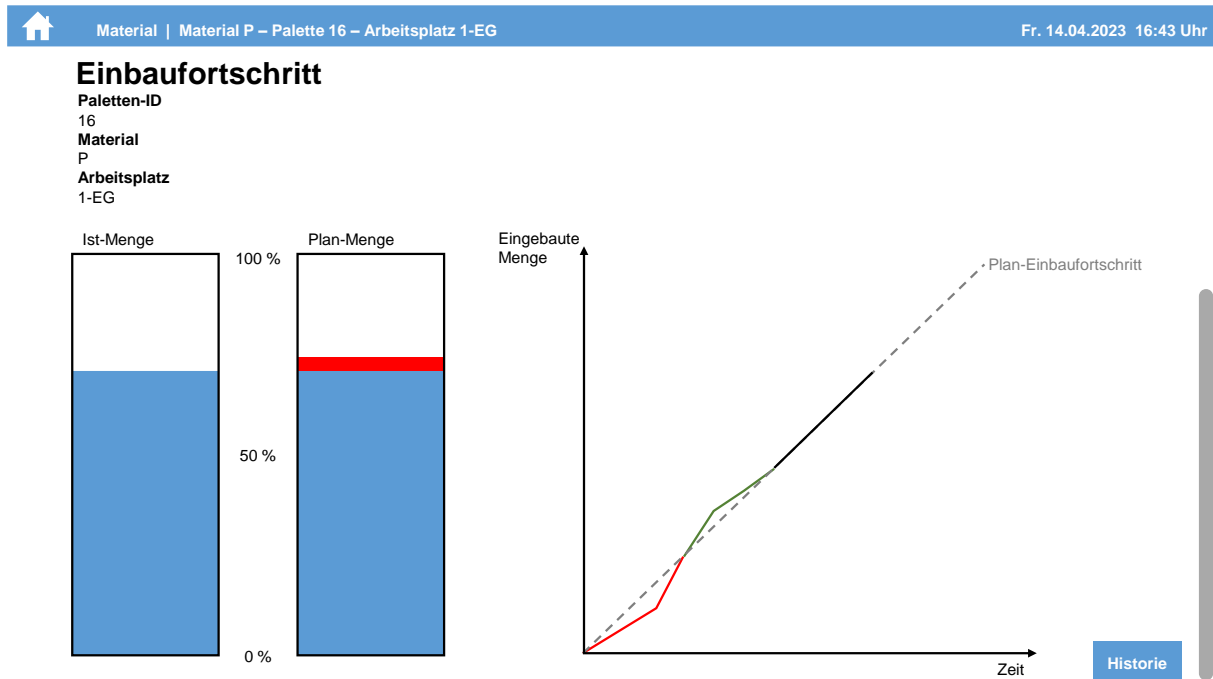


Abbildung 70: Dashboard „Baustellenversorgung über ein Warenverteilzentrum“ – Analyse⁶⁸⁷

Im Rahmen des Dashboards für das komplexe Ereignis „Baustellenversorgung über ein Warenverteilzentrum“ werden keine speziellen Benutzeroberflächen für die strategische und normative Managementebene vorgestellt. Die Eigenschaften und die Differenzierung der Dashboards im Kontext der verschiedenen Managementebenen sowie die sich daraus ergebenden Unterschiede hinsichtlich des Inhalts und der Visualisierung der Benutzeroberflächen sowie die nötige Datenaggregation werden im Zuge des Dashboards für das komplexe Ereignis „Baustellenversorgung von Stahlbetonfertigteilstützen“ thematisiert.

Das Dashboard für das komplexe Ereignis „Baustellenversorgung von Stahlbetonfertigteilstützen“ wird als Ergänzung zum vorherigen Dashboard schwerpunktmäßig aus der Sicht eines Produzenten entwickelt. Bei der Darstellung der konzipierten Benutzeroberflächen erfolgt eine Differenzierung nach den o. g. Managementebenen und deren Anforderungen hinsichtlich der Informationsdetaillierung.

Die normative Managementebene bspw. in Person der Geschäftsführung benötigt eine prägnante und kurze Informationsdarstellung auf Bereichs- respektive Werksebene sowie bei exponierten Projekten auf Projektebene. Der strategischen Managementebene bspw. in Person

⁶⁸⁷ In Anlehnung an Burmeister (2019): Durchführung einer Laborstudie zur Lokalisierung von Baustoffen mittels sensorgestützter IoT-Technologie, S. XXIII weiterentwickelt

der Werksleitung sollten darüber hinaus detaillierte Informationen auf Projektebene sowie je nach Erfordernis auf Bauteilebene bereitgestellt werden. Die größte Informationsdichte erhält das operative Management in Form von detaillierten Angaben zu den Planungs- und Ausführungsprozessen auf Bauteilebene. Die entsprechenden Benutzeroberflächen werden nachfolgend erläutert.

In Abbildung 71 ist für die normative Managementebene exemplarisch eine relative hohe Informationsdichte gewählt. Die normative Managementebene erhält, auf Basis der polysensoral erfassten Ist-Größen, auf Projektebene übersichtlich und komprimiert den Gesamtfortschritt hinsichtlich der eingebauten Stahlbetonfertigteilstützen angezeigt. Für eine Darstellung auf Werksebene werden die Informationen entsprechend angepasst und es können bspw. alle produzierten Bauteile innerhalb eines gewählten Zeitraums betrachtet werden. Wie bereits im Zuge des vorherigen Dashboards erläutert, ermöglicht auch dieses Dashboard automatisierte Plan-Soll-Ist-Vergleich sowie die daraus abzuleitenden Maßnahmen und Möglichkeiten. Des Weiteren werden auch bei diesem Dashboard alle Informationen und durchgeführten Analysen gespeichert und sind somit für Dokumentationszwecke, Nachkalkulationen oder Prognosemodelle verfügbar.

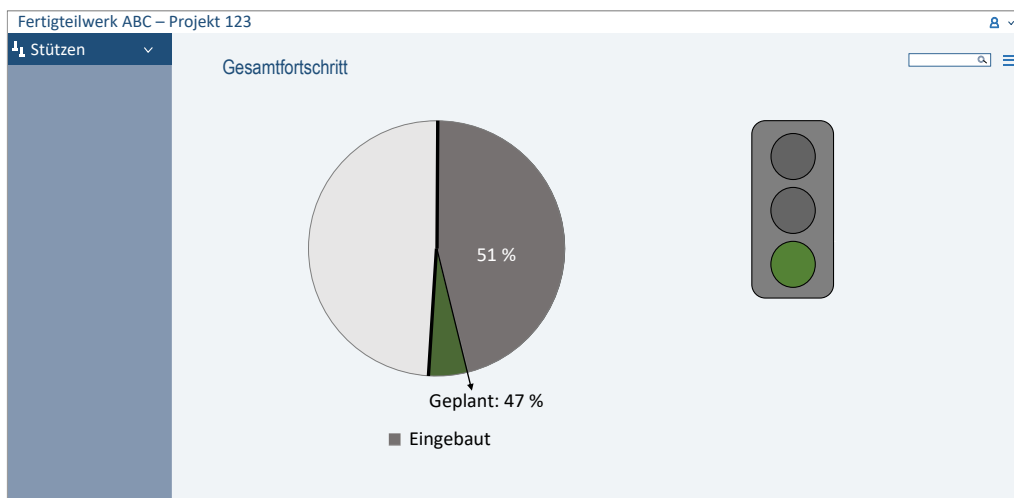


Abbildung 71: Dashboard „Baustellenversorgung von Stahlbetonfertigteilstützen“ – Normative Managementebene⁶⁸⁸

Ergänzend zur Benutzeroberfläche in Abbildung 71 sind für das strategische Management weitere Detaillierungen auf Projektebene denkbar. Die Benutzeroberfläche in Abbildung 72 stellt bspw. einen Überblick auf Projektebene hinsichtlich der verschiedenen Zustände respektive Prozessschritte dar. Neben der Visualisierung auf Projektebene ist wie bei der Darstellung des Gesamtfortschritts in Abbildung 71 eine Datenaggregation und somit eine Darstellung der Informationen auf Werksebene möglich.

⁶⁸⁸ In Anlehnung an Tröll (2021): Durchführung einer Baustellenstudie zum sensorgestützten Supply-Chain-Management bei Fertigteilstützen aus der Sicht des Produzenten, S. 92

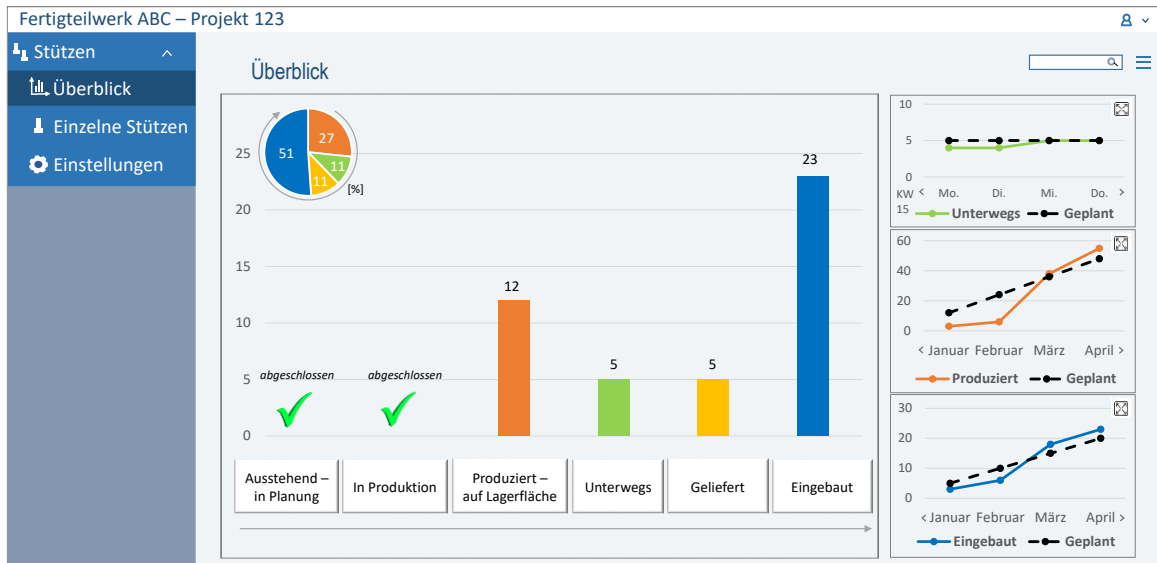


Abbildung 72: Dashboard „Baustellenversorgung von Stahlbetonfertigteilstützen“ – Strategische Managementebene⁶⁸⁹

Für die operative Managementebene können die Informationen über die verschiedenen Zustände respektive Prozessschritte wie in Abbildung 73 ersichtlich weiter detailliert und auf Bauteilebene abgerufen werden. Beim Auswählen einer bestimmten Stahlbetonfertigteilstütze oder bei der Nutzung der Suchfunktion werden dem Anwender Benutzeroberflächen mit einem höheren Detaillierungsgrad angezeigt.

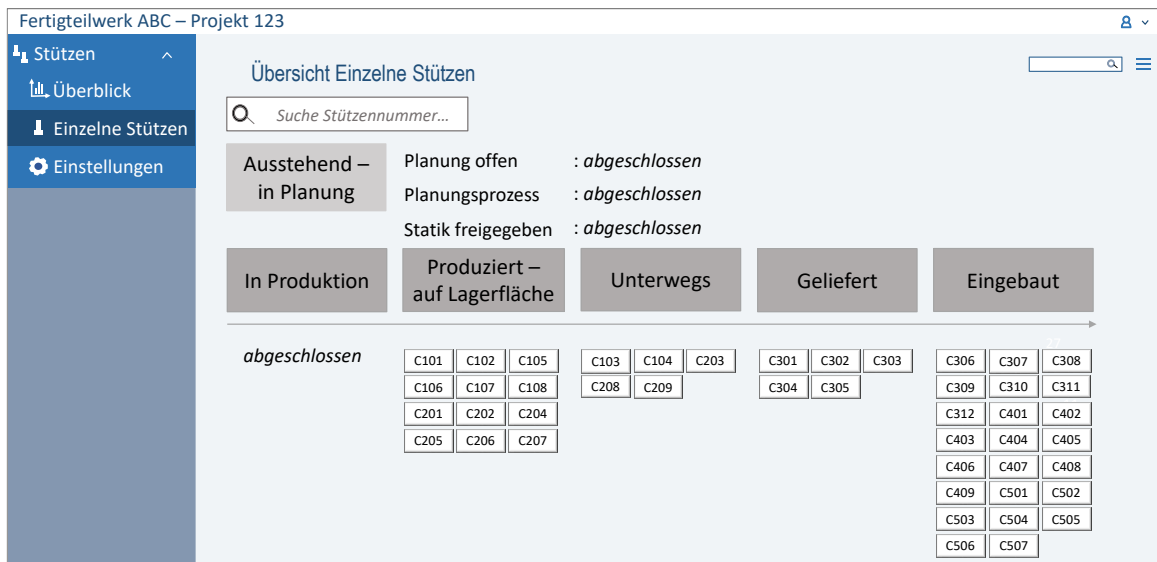


Abbildung 73: Dashboard „Baustellenversorgung von Stahlbetonfertigteilstützen“ – Operative Managementebene⁶⁹⁰

⁶⁸⁹ In Anlehnung an Tröll (2021): Durchführung einer Baustellenstudie zum sensorgestützten Supply-Chain-Management bei Fertigteilstützen aus der Sicht des Produzenten, S. 93 weiterentwickelt

⁶⁹⁰ In Anlehnung an Tröll (2021): Durchführung einer Baustellenstudie zum sensorgestützten Supply-Chain-Management bei Fertigteilstützen aus der Sicht des Produzenten, S. 95 weiterentwickelt

Die o. g. Benutzeroberflächen mit einem höheren Detaillierungsgrad sind beispielhaft für die Zustände „Produziert – auf Lagerfläche“ sowie „Unterwegs“ in den Abbildung 74 und 75 dargestellt. Neben den Informationen zum jeweiligen Zustand kann der Anwender bei diesen Benutzeroberflächen rechts von der Stützenbezeichnung ein Datenblatt mit Information zum Bauteil wie bspw. die Abmessungen, das Gewicht oder den Bewehrungsgrad aufrufen.

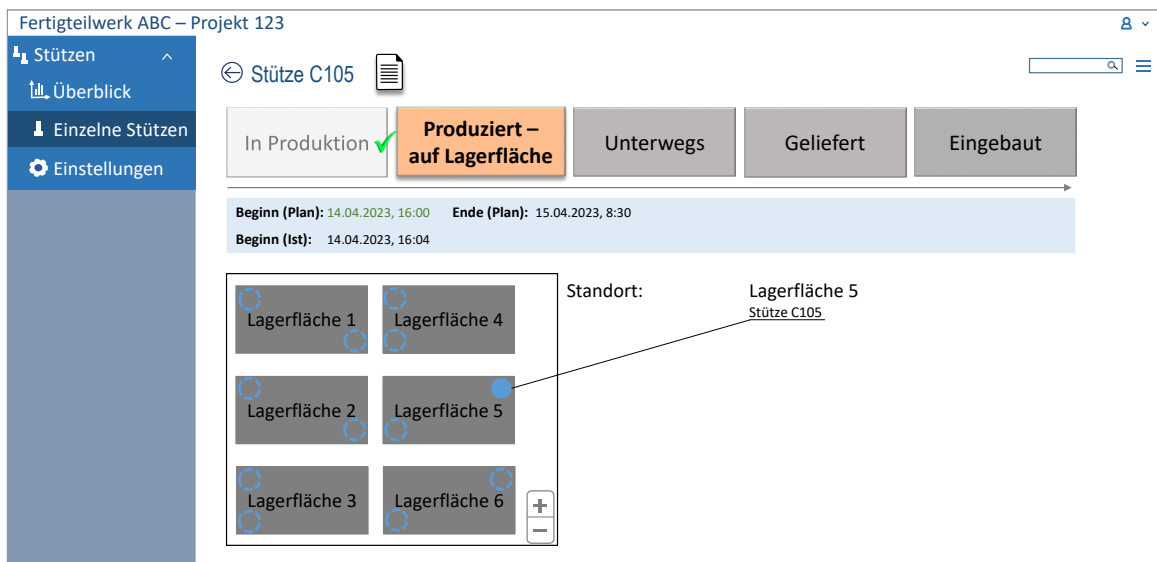


Abbildung 74: Dashboard „Baustellenversorgung von Stahlbetonfertigteilstützen“ – Operative Managementebene – Details I⁶⁹¹



Abbildung 75: Dashboard „Baustellenversorgung von Stahlbetonfertigteilstützen“ – Operative Managementebene – Details II⁶⁹²

⁶⁹¹ In Anlehnung an Tröll (2021): Durchführung einer Baustellenstudie zum sensorgestützten Supply-Chain-Management bei Fertigteilstützen aus der Sicht des Produzenten, S. 98 weiterentwickelt

⁶⁹² In Anlehnung an Tröll (2021): Durchführung einer Baustellenstudie zum sensorgestützten Supply-Chain-Management bei Fertigteilstützen aus der Sicht des Produzenten, S. 99 weiterentwickelt

Die beiden vorgestellten Dashboards haben nicht den Anspruch, eine vollumfängliche Darstellung der Benutzeroberflächen sowie eine abgeschlossene Entwicklung abzubilden. Durch die verschiedenen Benutzeroberflächen soll vielmehr ein plastischer Überblick zu den unterschiedlichen Möglichkeiten der Darstellung und Nutzung der polysensoral erfassten Ist-Größen und den daraus ableitbaren Ereignissen und Zuständen gegeben werden. Dementsprechend erfordern die Dashboards individuelle Anpassungen und Weiterentwicklungen nach projekt- oder unternehmensspezifischen Anforderungen. Eine nötige Weiterentwicklung stellt vor dem thematischen Hintergrund der vorliegenden Arbeit bspw. die Integration des Bestellprozesses und somit die Erweiterung um Funktionen zur Bestellabgabe und -annahme sowie zur Verfolgung des Bestellstatus im Dashboard dar. Neben der Visualisierung der Daten über ein Dashboard ist eine Integration und Darstellung der Daten in einem Bauwerksmodell möglich.

Die polysensoral erfassten Ist-Größen können in das Bauwerksmodell integriert und mit den im Bauwerksmodell definierten Plan-Größen verglichen werden. Das Bauwerksmodell ermöglicht somit die zeitnahe Durchführung von Plan-Ist-Vergleichen und darauf aufbauend weiterführende Rückschlüsse sowie Steuerungs- oder Regelungsmaßnahmen im Kontext der Produktivität, des Baufortschritts oder des Materialflusses.⁶⁹³ Das Bauwerksmodell stellt demzufolge durch die Definition der Plan-Größen nicht nur eine Informationsquelle sondern durch die Integration der Ist-Größen auch ein Instrument der Informationsaufbereitung dar.⁶⁹⁴

Bezogen auf den Anwendungsfall „Intelligente Palette“ wird diese im Bauwerksmodell modelliert und mit Informationen zu bspw. dem transportierten Material, dem Einbauort oder dem Einbauzeitpunkt ergänzt.⁶⁹⁵ Der Abruf sowie die Verwaltung der im Bauwerksmodell modellierten Paletten erfolgt über ein Plug-in, welches über eine Benutzeroberfläche bedient wird.⁶⁹⁶ In Abbildung 76 ist die Benutzeroberfläche der Palettenverwaltung dargestellt.

⁶⁹³ Vgl. Motzko et al. (2019): Zur Relevanz der Baulogistikplanung, S. 90

⁶⁹⁴ Vgl. Weil (2021): Ein Beitrag zur Anwendung der Lean Construction im schlüsselfertigen Hochbau, S. 168

⁶⁹⁵ Vgl. Motzko et al. (2019): Zur Relevanz der Baulogistikplanung, S. 90

⁶⁹⁶ Vgl. Weil (2021): Ein Beitrag zur Anwendung der Lean Construction im schlüsselfertigen Hochbau, S. 168

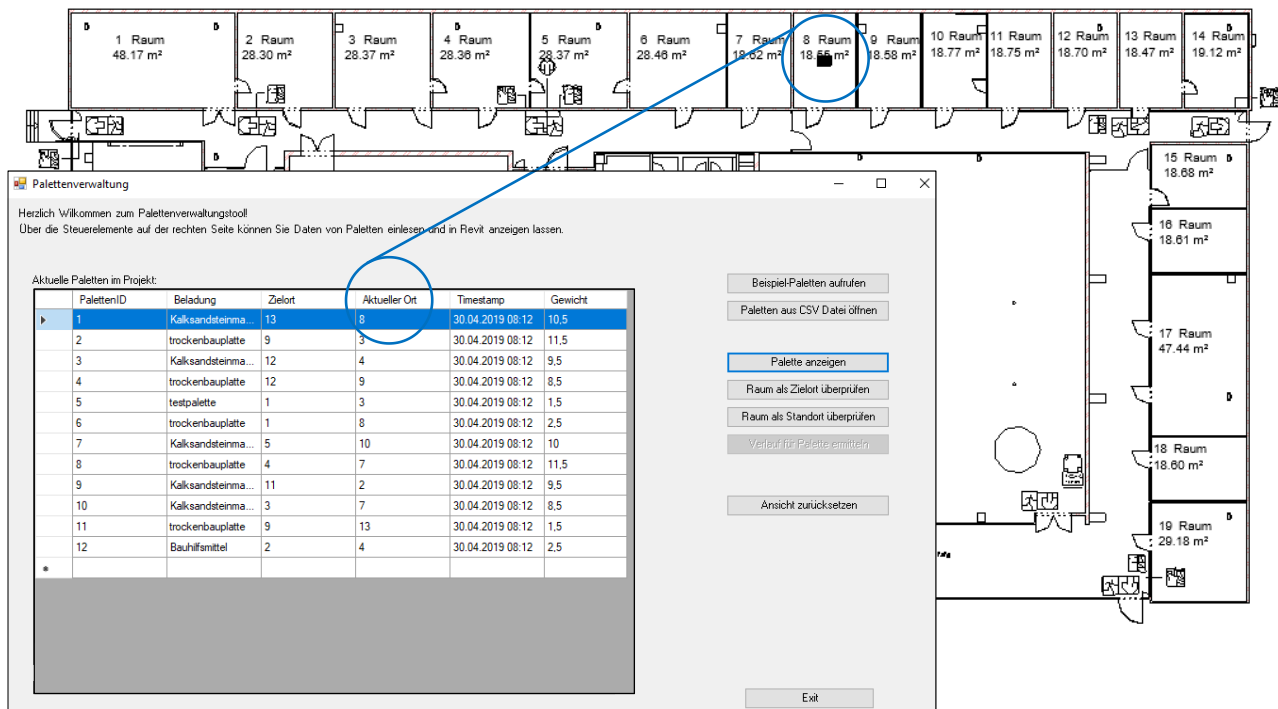


Abbildung 76: Bauwerksmodell – Plug-in „Palettenverwaltung“⁶⁹⁷

Neben den dargestellten Informationen zur Palette enthält das Plug-in verschiedene Such- und Filterfunktionen. Diese ermöglichen u. a. das Anzeigen des aktuellen Standorts aller Paletten, die einem bestimmten Zielort zugeordnet sind oder die Überprüfung, welche Paletten sich zum aktuellen Zeitpunkt an einem bestimmten Standort befinden. Darüber hinaus lässt sich der raum-zeitliche Verlauf der Paletten nachverfolgen. Ebenso wie die Dashboards ist auch das Plug-in nach projekt- oder unternehmensspezifischen Anforderungen individuell anzupassen und weiterzuentwickeln.⁶⁹⁸

Die im Kontext der erforderlichen Weiterentwicklung der Dashboards beschriebene Integration des Bestellprozesses wurde im Rahmen einer Abschlussarbeit⁶⁹⁹ für den Fall einer Verwendung eines Bauwerksmodells untersucht und anhand eines Plug-ins prototypisch entwickelt. Die relevante Benutzeroberfläche des entwickelten Plug-ins kann Abbildung 77 entnommen werden.

⁶⁹⁷ In Anlehnung an Motzko et al. (2021): Ausgewählte Aspekte des zeitnahen Controllings von Bauprojekten, S. 669

⁶⁹⁸ Vgl. Weil (2021): Ein Beitrag zur Anwendung der Lean Construction im schlüsselfertigen Hochbau, S. 169

⁶⁹⁹ Vgl. Nichterlein (2021): Entwicklung eines digitalen Tools zum Bestellvorgang mit der Methode Building Information Modeling (BIM)

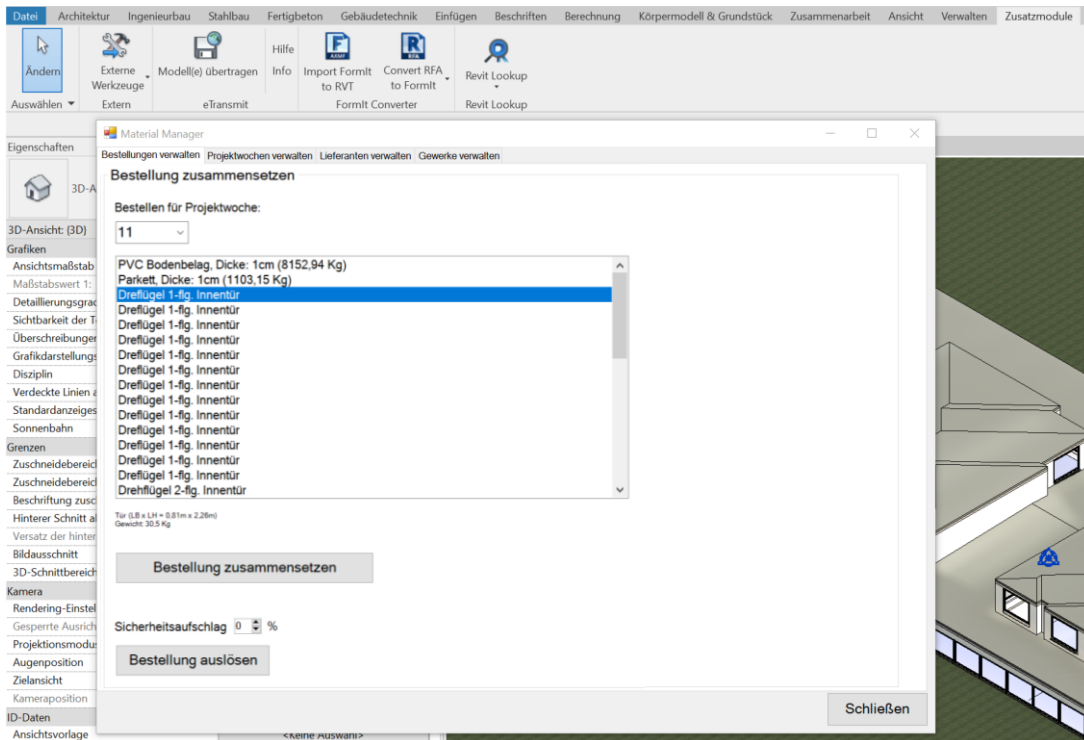


Abbildung 77: Bauwerksmodell – Plug-in „Bestellung“⁷⁰⁰

Das Plug-in ermöglicht neben der Verwaltung und der Durchführung von Bestellungen auch die Administration der für den Bestellprozess relevanten Input-Faktoren hinsichtlich der Gewerke, der Lieferanten sowie der Projektwochen oder der Bauablaufplanung. Anstelle der dargestellten Bestellung über die Auswahl der Projektwoche ist ebenso eine Bestellung nach Gewerken, Taktbereichen und Lieferanten oder durch die individuelle Auswahl von Bauteilen im Bauwerksmodell realisierbar. Auf Basis einer entsprechenden Attribuierung der Bauteile sowie einer Integration der erfassten Ist-Größen und der durchgeführten Bestellungen kann der jeweilige Bestellstatus abgerufen und dargestellt werden. An dieser Stelle wird deutlich, dass die beiden vorgestellten Plug-ins in der praktischen Anwendung zusammenzuführen sind und ein gegenseitiger Informationsaustausch bspw. bezüglich des aktuellen Standorts einer Palette erfolgen sollte.

Für die Nutzung der Plug-ins innerhalb des Warenverteilzentrums sowie der stationären Produktionsstätten sollten zum Bauwerksmodell äquivalente Modelle dieser Bereiche des Materialflusses initiiert werden. Durch die Verknüpfung zwischen dem entwickelten polysensoralen System und weiteren Informationsmodellen auf Basis von 3D-Modellen, ist die Dokumentation sowie die zentrale Bereitstellung der relevanten Informationen für die Projektbeteiligten in Echtzeit nicht auf das Bauwerk respektive das Bauwerksmodell beschränkt, sondern ebenso innerhalb des Warenverteilzentrums und der stationären Produktionsstätten möglich.

⁷⁰⁰ In Anlehnung an Nichterlein (2021): Entwicklung eines digitalen Tools zum Bestellvorgang mit der Methode Building Information Modeling (BIM), S. 84

Systembewertung

Die Systembewertung dieses Anwendungsfalls erfolgt auch vor dem Hintergrund und den Ergebnissen der vorherigen Anwendungsfälle sowie in dem im Zuge der Systembewertungen dieser Anwendungsfälle angesprochenen Gesamtzusammenhang. Die folgende Systembewertung wird nach technischen und funktionalen Aspekten gegliedert.

Das Hauptziel des Anwendungsfalls „Intelligenter Materialfluss“ ist eine automatisierte Prozessidentifikation durch eine polysensorale Erfassung der verschiedenen Zustände innerhalb der definierten komplexen Ereignisse „Baustellenversorgung über ein Warenverteilzentrum“ und „Baustellenversorgung von Stahlbetonfertigteilstützen“. Die automatisierte Prozessidentifikation ermöglicht eine Überwachung sowie eine Digitalisierung des Materialflusses in Echtzeit und ist gleichzeitig die Basis für das übergeordnete Ziel eines Bauprozessmanagements in Echtzeit und damit verbunden einer aktiven Steuerung und Regelung von Bauproduktionsprozessen.

Die Systemeinsätze des entwickelten polysensoralen Systems belegen, dass es möglich ist, die o. g. Zustände respektive Ereignisse sensorisch zu erfassen und den Prozess automatisiert zu identifizieren. Neben der automatisierten Erfassung enthält das System die erforderlichen Funktionen für die Analyse und die Kommunikation der prozessrelevanten Informationen in Echtzeit. Das System automatisiert, digitalisiert, analysiert, kommuniziert und dokumentiert die Erfassung der Materialflüsse und leistet somit einen Beitrag zum Bauprozessmanagement in Echtzeit und unterstützt die aktive Steuerung und Regelung von bauleistungsprozessen. Die im Zuge der funktionalen Systemanforderungen in Abbildung 39 und Abbildung 40 dargestellten Prozessketten können durch das System digital abgebildet und in Echtzeit mit relevanten Informationen zum Materialfluss angereichert werden. Das entwickelte polysensorale System kann somit darüber hinaus auch als Informationsversorgungssystem interpretiert werden, welches die generierten Informationen den Prozessbeteiligten und -verantwortlichen in Echtzeit zugänglich und nutzbar macht. Zu diesen Informationen zählen bspw. die Materialstandorte und -bestände der einzelnen Versorgungspakete im Warenverteilzentrum, auf der Baustelle und im Taktbereich oder Arbeitsplatz sowie die damit in Verbindung stehenden Transportprozesse. Das System verbessert daher die im Zuge dieser Arbeit analysierten Schwachstellen im Kontext der Baustellenversorgung. Diese Verbesserungen werden im Folgenden auszugsweise detaillierter beschrieben.

Durch die eindeutige Identifikation sowie die Gewichts- und Positionserfassung der intelligenten Palette innerhalb des Warenverteilzentrums, der Baustelle und dem Taktbereich oder Arbeitsplatz vereinfacht und verbessert das System den Materialfluss und im Speziellen die Synchronisation zwischen Bauproduktions- und Versorgungstakt im Sinne des JIT-Prinzips. Auf Grund der Lagerung der einzelnen und taktgerecht vorkommissionierten Versorgungs-

pakete auf einer intelligenten Palette und den sich daraus ergebenden Informationen, vereinfacht sich die Durchführung sowie die Steuerung und Regelung einer taktgenauen Versorgung der Arbeitsplätze. Damit einher geht eine Verschwendungsreduzierung, bspw. in Form von Such- und Wartezeiten, in den bauleistungsorientierten Prozessen.

Auf Basis vordefinierter Bestandsmengen innerhalb eines Takts sowie einer, mit Hilfe der intelligenten Palette möglichen, automatisierten Baufortschrittskontrolle sind automatisierte Materialabrufe realisierbar. Bei der Nutzung des Gewichtssensors zur Baufortschrittskontrolle ist sicherzustellen, dass seitens der Arbeitskräfte keine Manipulationen der Datenerfassung, wie bspw. das Entladen der Palette ohne einen unmittelbaren Materialeinbau, erfolgen. Diese Manipulationen könnten durch den Einsatz bildgebender Sensoren⁷⁰¹, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht untersucht wurden, erkannt werden.

Neben den Verbesserungen des Materialflusses ermöglicht das System auch eine Verbesserung des Informationsflusses und -austauschs sowie eine verbesserte Kommunikation aller Prozessbeteiligten. Der durchgängige, automatisierte, systematisierte und digitalisierte Informationsfluss und -austausch im Hinblick auf die Baustellenversorgung führt zu einer Reduzierung von manuellen, fehleranfälligen Prozessen im Kontext der Informationsverarbeitung. Der Informationsfluss wird besser dokumentiert und folglich transparenter und nachvollziehbarer realisiert. Es erfolgen weniger Medienbrüche und die Datenqualität und -quantität werden erhöht. Die Informationsdarstellung und -aufbereitung für die Prozessbeteiligten werden dabei durch die Verwendung von Dashboards in Form von grafischen Benutzeroberflächen sowie Plug-ins in Bauwerksmodellen unterstützt und bieten dem Systemnutzer einen Mehrwert.

Die o. g. Prozessidentifikation und die damit in Verbindung stehende automatisierte Erfassung von Ist-Größen unterstützen und erleichtern die Durchführung von Plan-Soll-Ist-Vergleichen. Die Ergebnisse der Plan-Soll-Ist-Vergleiche sowie die daraus resultierenden Maßnahmen und Möglichkeiten dienen dem beschriebenen übergeordneten Ziel des Bauprozessmanagements in Echtzeit und liefern Input-Parameter für die Bauprozessbewertung und -beurteilung. An dieser Stelle ist anzumerken, dass sich die vorliegende Arbeit auf Termin- und Mengen-Plan-Soll-Ist-Vergleiche fokussiert. Die Erfassung von Ist-Qualitäten erfordert den Einsatz von weiteren Sensoren wie bspw. den bereits o. g. bildgebenden Sensoren.

Ein weiterer Aspekt, den das entwickelte System nicht abdeckt, ist die Erfassung von Ist-Kosten. Für die Erfassung von stichtagsbezogenen Ist-Kosten ist entweder der Zugriff auf eine möglichst echtzeitnah geführte interne Buchhaltung oder eine Integration von externen Systemen wie bspw. die Buchhaltung der verschiedenen Lieferanten nötig. Neben einer Untersuchung zu den rechtlichen Aspekten und Grundlagen dieser Integration konnte auch der

⁷⁰¹ Vgl. Motzko (2010): Digitale Schnittstellen im Bauwesen, S. 37

hierzu benötigte umfangreiche programmiertechnische Aufwand im Zuge der vorliegenden Arbeit nicht umgesetzt werden.

Aus selbigen Gründen konnte die angestrebte digitale Verknüpfung und Einbindung der Warenwirtschafts- respektive Lagerverwaltungssysteme der Lieferanten, Händler oder Produzenten in das System und somit eine vollumfängliche digitale Zusammenführung der Prozesse der Bestellung, der Ausführung und der o. g. Buchhaltung nicht realisiert werden. Erste Ansätze für einen digitalen, transparenten, standardisierten und durchgängigen Bestellprozess sowie einen virtuellen Warenkorb und einen digitalen Bestand sind innerhalb des Plug-ins für den Bestellprozess in einem Bauwerksmodell entwickelt. Die Datenübertragung des Plug-ins ist jedoch monodirektional und es erfolgt kein Datenaustausch mit den o. g. externen Systemen der Buchhaltung, der Lagerverwaltung oder der Warenwirtschaft. Für eine bidirektionale Datenübertragung, einen Zugriff auf Daten externer Systeme sowie einen Informationsaustausch dieser Systeme, sind standardisierte Schnittstellen anzustreben, zu definieren und zu entwickeln. Diese Aspekte sind darüber hinaus auch Grundlage für die Umsetzung des angesprochenen virtuellen Warenvertelzentrums.

Neben den technischen Herausforderungen im Kontext der Integration externer Systeme ist hinsichtlich der technischen Bewertung festzustellen, dass ein wesentlicher Faktor für einen erfolgreichen Systemeinsatz die Sicherstellung einer durchgängigen und stabilen Datenübertragung durch die eingesetzten Funktechnologien ist. Hierbei ist eine dauerhafte Funktionsfähigkeit der einzelnen Systemkomponenten zum Senden und Empfangen der Daten zu gewährleisten. Des Weiteren sind die beschriebenen Limitationen bezüglich der Funkreichweiten der verschiedenen Funktechnologien einzuhalten.

Die Genauigkeit der erfassten Daten ermöglicht grundsätzlich die o. g. automatisierte Prozessidentifikation sowie die sensorische Erfassung der definierten Zustände respektive Ereignisse. Bei der Zonenerkennung anhand von BLE-Beacons und deren Signalstärke (RSSI) ist eine Häufung fehlerhafter Messungen zu konstatieren. Die fehlerhafte Zonenerkennung kann auf die Schwankungen der Signalstärken der einzelnen BLE-Beacons zurückgeführt werden. Daher empfiehlt es sich, qualitativ hochwertige sowie gleichartige BLE-Beacons mit geringen Streuungen hinsichtlich der Signalstärke zu verwenden. Darüber hinaus wird auf die beiden bereits beschriebenen Aspekte der empfohlenen Zonengröße sowie der Einrichtung von Pufferzonen verwiesen.

Eine weitere Möglichkeit, die Zonenerkennung zu verbessern besteht darin, neben der Signalstärke weitere Messgrößen zu erfassen und auszuwerten. Ein zielführender Ansatz ist die Messung und die Auswertung des Ankunfts winkels (AoA) des BLE-Signals. Die entsprechenden Lösungen sind für den Einsatz im Innenbereich am Markt verfügbar⁷⁰², konnten aber aus

⁷⁰² Vgl. www.quuppa.com/de/

Kapazitätsgründen sowie auf Grund der Covid-19-Pandemie im Zuge der vorliegenden Arbeit hinsichtlich einer Baustellentauglichkeit im Innen- und Außenbereich nicht weiterführend untersucht werden. Die Messung des Ankunfts winkels erfordert fest installierte Gateways und dementsprechend mobile BLE-Beacons. Diese Konfiguration der Gateways und der BLE-Beacons ist zwar konträr zum vorliegenden Anwendungsfall, erlaubt aber grundsätzlich dennoch eine problemlose Umsetzung des Konzepts zur sensorischen Erfassung der definierten Zustände respektive Ereignisse. Die angesprochenen am Markt verfügbaren Lösungen erfordern die Installation von einzelnen Systemkomponenten oberhalb des Einsatzbereichs, wie bspw. die Befestigung von Systemkomponenten an einer Hallendecke. Dieser Aspekt ist ein Grund dafür, dass der Aufwand für den Aufbau der notwendigen Infrastruktur bei einem auf AoA-basierten System größer ist als bei einer auf RSSI ausgelegten Infrastruktur. Hierbei ist anzumerken, dass auch der Installationsaufwand bei einem auf RSSI-basierten System nicht zu vernachlässigen ist. Da die Installation der Infrastruktur bei dem Feldversuch auf der Baustelle etappenweise und im Rahmen des Forschungsprozesses iterativ erfolgte, kann der Installationsaufwand an dieser Stelle nicht belastbar quantifiziert werden. Im Hinblick auf die Installation eines AoA-basierten Systems auf einer Baustelle ist die Realisierbarkeit auf Grund der o. g. Installation von einzelnen Systemkomponenten oberhalb des Einsatzbereichs sowie der teilweise notwendigen kabelgebundenen Infrastruktur als kritisch und herausfordernd zu beurteilen.

Das System kann auf Grund seiner Variabilität bei weiteren Anwendungsfällen eingesetzt werden und dadurch intelligente Bauteile generieren, die eine Verknüpfung der Material- und Informationsflüsse und somit die beschriebene verbesserte aktive Steuerung und Regelung der Baustellenversorgung ermöglichen. Das Konzept zur Erfassung des Einbauzeitpunkts anhand einer Neigungsänderung lässt sich bspw. auf Elementfassaden, Stahlbauteile oder Betonschalungen übertragen. Ebenso ergeben sich auf der Baustelle vielfältige Möglichkeiten zur Nutzung des entwickelten und beprobten Systems zur Positionsbestimmung. Grundsätzlich sollte bei der Weiterentwicklung und der Nutzung solcher Systeme projekt- und prozessindividuell geprüft werden, welche Daten zu erfassen sind und wem diese Daten zur Verfügung gestellt werden und einen Mehrwert bieten. Hierdurch soll einer Überforderung der Systemnutzer auf Grund einer Überflutung an Daten und Informationen sowie der damit in Verbindung stehenden Big Data Thematik entgegengewirkt werden. Das entwickelte System hat den arbeitenden Menschen sowohl bei der Bauprozessgestaltung und -steuerung als auch bei seinen Entscheidungen, Interpretationen und Schlussfolgerungen zu Ergebnissen, Daten und Informationen zu unterstützen und weder zu überfordern noch zu ersetzen.^{703, 704}

⁷⁰³ Vgl. Motzko (2008): IT-Simulation und Realität – Eine baubetriebliche Betrachtung, S. 73

⁷⁰⁴ Vgl. Motzko (2010): Digitale Schnittstellen im Bauwesen, S. 38

5 Systemintegration

Im folgenden Kapitel wird das entwickelte Baustellenversorgungssystem in das bestehende Baulogistikprozessmodell integriert. Hierzu wird das Baulogistikprozessmodell analysiert und vor dem Hintergrund einer Anwendung des Baustellenversorgungssystems präzisiert, ergänzt und erweitert. Die Integration erfolgt entlang des zeitlichen Projektverlaufs und orientiert und gliedert sich nach den Phasen der Baulogistikinitiierung, der Baulogistikplanung, der Baulogistikorganisation sowie der Baulogistikrealisierung. Durch die Integration ergibt sich innerhalb der verschiedenen HOAI-Leistungsphasen ein erweitertes Leistungsbild im Vergleich zu dem von RUHL et al.⁷⁰⁵ empfohlenen Leistungsbild der Baulogistikplanung. In Abbildung 78 ist die Ausgangssituation der Systemintegration gezeigt.

Baulogistikprozessmodell

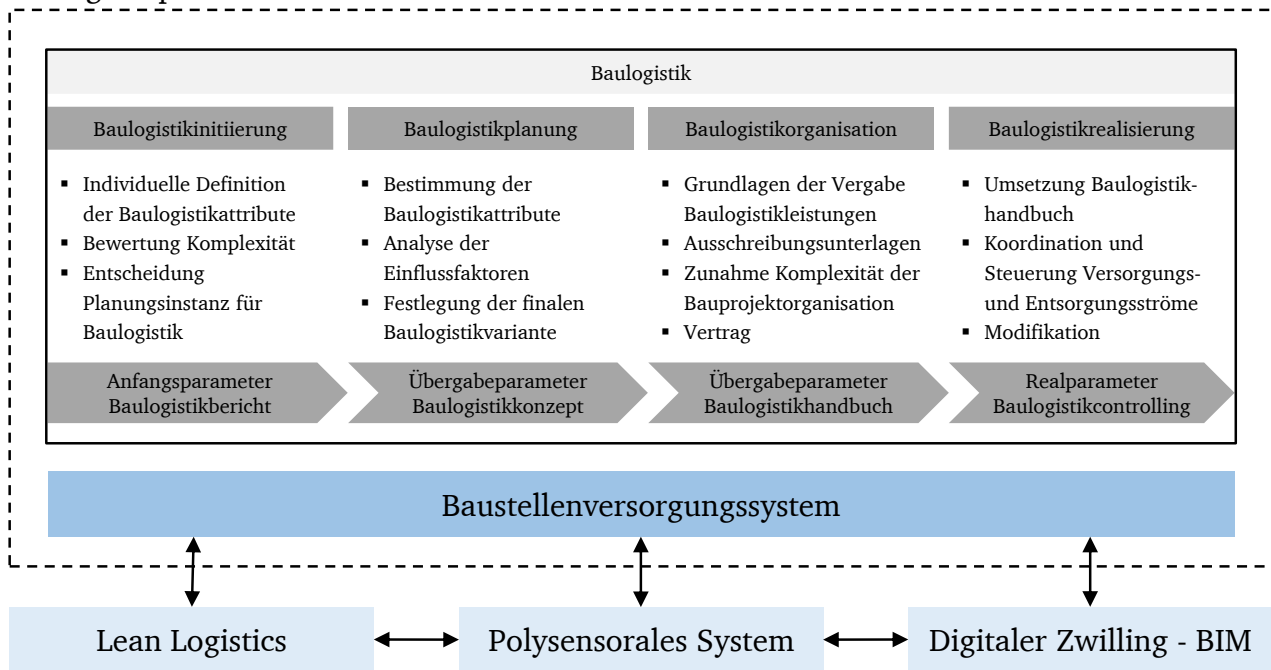


Abbildung 78: Ausgangssituation der Systemintegration⁷⁰⁶

Das Baustellenversorgungssystem basiert, wie bereits in den vorherigen Kapiteln erläutert, auf dem Grundgedanken eines Warenverteilzentrums und wird durch Ansätze der Lean Logistics auf Basis der Lean Construction sowie durch den Einsatz des in Kapitel 4.2 entwickelten polysensoralen Systems unterstützt. Darüber hinaus erfolgt die Einbindung eines Bauwerksmodells in dem die Plan-Größen definiert sind und welches somit als Informationsquelle dient. Durch die beschriebene zusätzliche Integration der sensorisch erfassten Ist-Größen

⁷⁰⁵ Vgl. Ruhl et al. (2018): Baulogistikplanung, S. 19 ff.

⁷⁰⁶ Eigene Darstellung

ßen in das Bauwerksmodell verfügt das Baustellenversorgungssystem auch über ein Instrument zur Informationsaufbereitung. Es entsteht eine bidirektionale Kommunikation zwischen Realität und Modell, die sich an dem Konzept des digitalen Zwillings orientiert. Die beschriebenen Aspekte Lean Logistics, polysensorales System und digitaler Zwilling beeinflussen sich untereinander respektive sind voneinander abhängig und haben sowohl als einzelnes Element und Teilsystem des Baustellenversorgungssystems als auch als Konglomerat Einfluss auf das Baustellenversorgungssystem. Der Fokus der folgenden Integration liegt in der Einbindung des Warenverteilzentrums als substanzieller Bestandteil des Baustellenversorgungssystems, in das Baulogistikprozessmodell. Die Auswirkungen, Abhängigkeiten und Einflüsse der unterstützenden Teilsysteme auf das Baulogistikprozessmodell werden an den entsprechenden Stellen aufgezeigt.

Die Integration des Baustellenversorgungssystems in das Baulogistikprozessmodell erfolgt grundsätzlich unabhängig von der Unternehmenseinsatzform des Gesamtprojekts. Lediglich im Kontext der Diskussion zu den möglichen Betreibern eines Warenverteilzentrums wird Bezug zu den verschiedenen Unternehmenseinsatzformen und den sich daraus ergebenden Projektorganisationen genommen. Die Integration unabhängig der Unternehmenseinsatzform ist damit zu begründen, dass die Unternehmenseinsatzform zwar Einfluss auf die Integration besitzt, sich diese Einflüsse aber hauptsächlich in ihrer zeitlichen Komponente voneinander unterscheiden. Es ist daher relevanter zu definieren, welche zusätzlichen Prozesse sich durch die Integration ergeben, anstatt eine direkte Prozessverantwortung festzulegen. Es ist zunächst nicht relevant, welche Instanz den Prozess ausführt, sondern welche zusätzlichen Prozesse sich zu welchem Zeitpunkt im Projektverlauf bei der Integration des Baustellenversorgungssystems ergeben. Die anschließende Prozessverantwortung und -durchführung ergibt sich projektindividuell durch den Eintrittszeitpunkt der verschiedenen Unternehmenseinsatzformen in das Projekt sowie den beauftragten Leistungen in Verbindung mit den entsprechenden vertraglichen Regelungen.

An dieser Stelle ist anzumerken, dass grundsätzlich und losgelöst von der folgenden Integration davon ausgegangen werden kann, dass bei den Unternehmenseinsatzformen Totalübernehmer und Totalunternehmer sowie Generalübernehmer und Generalunternehmer eine ganzheitliche Baulogistikorganisation in den Unternehmens- und Projektzielen während der gesamten Projektlaufzeit verankert ist und diese Unternehmenseinsatzformen das Projekt als Ganzes im Blick haben. Im Gegensatz hierzu ist bei Einzelvergaben in der Regel zu beobachten, dass jedes Unternehmen das eigene Leistungsspektrum und die hierfür notwendigen baulogistischen Prozesse ohne Rücksicht auf die weiteren Bauprojektbeteiligten in den Fokus rückt und zunächst jedes Einzelunternehmen seine singulären Unternehmensinteressen verfolgt. Die einzeln beauftragten Unternehmen würdigen somit erwartbarerweise die baulogistischen Belange der weiteren Bauprojektbeteiligten nicht so intensiv wie dies bei den Unternehmenseinsatzformen Totalübernehmer und -unternehmer sowie Generalübernehmer und

-unternehmer der Fall ist. Dies ist damit zu begründen, dass diese Unternehmenseinsatzformen ein grundlegendes Interesse daran haben, dass alle tätigen Unternehmen respektive beauftragten Nachunternehmer mit adäquater Rücksichtnahme gegenüber den weiteren Bauprojektbeteiligten agieren. Hiermit verbunden ist seitens der Totalübernehmer und -unternehmer sowie Generalübernehmer und -unternehmer die zweckmäßige Gestaltung und ggf. Umgestaltung sowie Vorhaltung der baulogistischen Baustelleninfrastruktur in der Form, dass die Leistungserbringung der einzelnen Bauprojektbeteiligten ohne Schwierigkeiten hinsichtlich des Gesamt Ablaufs erfolgen kann. Neben der zweckmäßigen Gestaltung und ggf. Umgestaltung sowie Vorhaltung der baulogistischen Baustelleninfrastruktur haben die Unternehmenseinsatzformen Totalübernehmer und -unternehmer zusätzlich die Möglichkeit, bereits im Planungsprozess Aspekte ihrer Ausführungsprozesse berücksichtigen zu können.^{707, 708, 709} Hierbei ist davon auszugehen, dass der Totalübernehmer und -unternehmer detailliertere Kenntnisse über seine individuellen Produktionsprozesse besitzt und diese zielführender in der Planung berücksichtigen kann als eine externe Planungsinstanz. Trotz der geschilderten Tendenz, dass Kumulativleistungsträger baulogistische Belange eher berücksichtigen als beauftragte Einzelunternehmen, bedeutet dies nicht automatisch, dass die Baulogistik bei Kumulativleistungsträgern zielführender umgesetzt wird als dies im System der Einzelvergabe der Fall ist. Es ist bspw. denkbar, dass die Bauherrschaft im System der Einzelvergabe die Baulogistik prioritär behandelt und diese im Projekt eine adäquate Relevanz besitzt. Demzufolge wird der Bauherr die Baulogistik frühzeitig initiieren und in Abhängigkeit der baulogistischen Komplexität entsprechende baulogistische Planungs- und Ausführungsleistungen beauftragen. Diese Vorgehensweise kann dazu führen, dass die Baulogistik in diesem Fall sach- und fachgerechter durchgeführt wird als bei einem Kumulativleistungsträger, der die baulogistischen Belange mit einer untergeordneten Priorität behandelt.

Die Ausführungen zu den Unternehmenseinsatzformen im Kontext der Baulogistik zeigen, dass es für die Baulogistik in Bezug auf die Zuordnung der baulogistischen Aufgaben einen Unterschied macht, auf welcher Unternehmenseinsatzform und somit Bauprojektorganisation das Bauprojekt basiert. Für die Baulogistikplanung ist die Unternehmenseinsatzform jedoch bis zur Fertigstellung des Baulogistikkonzepts von untergeordneter Relevanz. Das Baulogistikkonzept des Bauprojekts kann somit zunächst unabhängig von der Unternehmenseinsatzform geplant werden. Trotzdem sollte bereits im Zuge des Baulogistikberichts hinsichtlich der zeitlichen Projektentwicklung sowie der Projektstruktur die vorgesehene Unterneh-

⁷⁰⁷ Vgl. Ruhl (2016): Entwicklung eines Baulogistikprozessmodells, S. 165 f.

⁷⁰⁸ Vgl. Ruhl et al. (2018): Baulogistikplanung, S. 27 f.

⁷⁰⁹ Vgl. Motzko (2020): Baulogistik, S. 599

menseinsatzform definiert werden. Dieser Aspekt stellt aber keine für die Baulogistik spezifische Thematik dar.⁷¹⁰ Die dargelegte untergeordnete Relevanz der Unternehmenseinsatzform in den frühen Baulogistikplanungsphasen unterstützt die o. g. Thesen und das Vorgehen hinsichtlich einer zunächst allgemein gültigen und generalisierenden Integration des entwickelten Baustellenversorgungssystems in das bestehende Baulogistikprozessmodell, unabhängig der Unternehmenseinsatzform. Um das unternehmerische Handeln seitens der Totalübernehmer und -unternehmer sowie Generalübernehmer und -unternehmer zu fördern, kann es zielführend sein, bei der Ausarbeitung des Baulogistikkonzepts respektive Baulogistikhandbuchs diesen Unternehmenseinsatzformen mehr Freiheiten einzuräumen als im System der Einzelvergabe. Hier sollten im Hinblick auf eine funktionierende Baulogistik die Freiheitsgrade innerhalb des Baulogistikkonzepts und -handbuchs reduziert werden und prinzipiell ein enges Korsett ohne Interpretationsspielraum geschaffen werden.

Die in den folgenden Unterkapiteln dargestellte Integration des entwickelten Baustellenversorgungssystems in das bestehende Baulogistikprozessmodell erfolgt auf Basis von durchgeführten Experteninterviews und deren Auswertungen im Rahmen von Abschlussarbeiten^{711, 712, 713, 714, 715, 716} sowie einer darauf aufbauenden und durch den Verfasser dieser Arbeit durchgeführten übergeordneten Analyse dieser Experteninterviews und deren Ergebnisse vor dem Hintergrund einer Systemintegration.

Neben der grundlegenden Integration des Baustellenversorgungssystems in das Baulogistikprozessmodell wird jedes Unterkapitel mit Ausführungen zum Baustellenversorgungssystem in Bezug zur Nachhaltigkeit abgeschlossen. Die gegebenen exemplarischen Hinweise betrachten dabei sowohl die Unternehmens- als auch die Projektebene. Die erforderlichen Betrachtungen auf der Unternehmensebene resultieren aus der Verpflichtung zur Nachhaltigkeitsberichterstattung⁷¹⁷. Diese Verpflichtung ist vor dem Hintergrund der Umsetzung politischer Zielsetzungen der Europäischen Union wie bspw. dem European Green Deal, das Ergebnis der Weiterentwicklung der nicht-finanziellen Berichterstattung.⁷¹⁸ Die Betrachtungen auf der

⁷¹⁰ Vgl. Ruhl (2016): Entwicklung eines Baulogistikprozessmodells, S. 166 f.

⁷¹¹ Vgl. Deuringer (2021): Eine Untersuchung zum Einsatz des Baulogistikprozessmodells und zur Bewertung der baulogistischen Komplexität in Abhängigkeit der Unternehmenseinsatzform

⁷¹² Vgl. Gammersbach (2021): Erstellung von Projektprofilen im Kontext des Systems „Warenverteilzentrum“ in der Bauwirtschaft

⁷¹³ Vgl. Grieser (2021): Entwicklung von Projektprofilen im Kontext des Systems „Warenverteilzentrum“ in der Bauwirtschaft

⁷¹⁴ Vgl. Lerche (2021): Eine Analyse von Warenverteilzentren in der Bauwirtschaft im Kontext der Organisation, der Koordination sowie der Initiatoren und Betreiber

⁷¹⁵ Vgl. Sauer (2020): Eine Untersuchung zu Warenverteilzentren in der Bauwirtschaft im Kontext der Organisation sowie der Initiatoren und Betreiber

⁷¹⁶ Vgl. Zellner (2022): Eine Studie zur Integration des Systems Warenverteilzentrum in ein bestehendes Baulogistikprozessmodell

⁷¹⁷ Vgl. Europäische Kommission (2022): RICHTLINIE (EU) 2022/2464 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 14. Dezember 2022 zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 537/2014 und der Richtlinien 2004/109/EG, 2006/43/EG und 2013/34/EU hinsichtlich der Nachhaltigkeitsberichterstattung von Unternehmen

⁷¹⁸ Vgl. www.deutscher-nachhaltigkeitskodex.de/de-DE/Home/Berichtspflichten/CSRD

Projektebene basieren auf den Anforderungen hinsichtlich der verschiedenen Zertifizierungssysteme für Bauwerke^{719, 720, 721} und Baustellen^{722, 723} in Deutschland sowie deren Kriterienkataloge und Bewertungsrichtlinien.

⁷¹⁹ Vgl. Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (2019): Leitfaden Nachhaltiges Bauen

⁷²⁰ Vgl. Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V. (2020a): DGNB Leitfaden – Ihr Weg zum klimaneutralen Gebäude

⁷²¹ Vgl. Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V. (2020b): Rahmenwerk für klimaneutrale Gebäude und Standorte

⁷²² Vgl. DGNB GmbH (o. J.): Baustelle von Anfang an nachhaltig

⁷²³ Vgl. www.dgnb-system.de/de/gebaeude/baustelle/

5.1 Baustellenversorgungssystem – Initiierung

Der Prozess der Baulogistikinitiierung wird durch den Baulogistikbericht dokumentiert. Desse Fokus liegt auf der Analyse und Bewertung der Baulogistikattribute hinsichtlich ihrer Komplexität, auf der grundsätzlichen Formulierung und Definition der baulogistischen Einflussgrößen sowie auf der Entwicklung der baulogistischen Ziele unter gleichzeitiger Würdigung des Leistungsumfangs einschließlich der Bestimmung der notwendigen Qualifikationen. Die Erstellung des Baulogistikberichts schließt den Prozess der Baulogistikinitiierung ab und dient der Bauherrschaft als Entscheidungsgrundlage in Bezug auf die Ausrichtung und Beauftragung baulogistischer Fachplanungsleistungen.⁷²⁴ Es gilt, diese Entscheidungsgrundlage im Kontext einer Anwendung des Baustellenversorgungssystems sowie dessen Initiierung zu präzisieren, zu ergänzen und zu erweitern.

Eine Berücksichtigung des Baustellenversorgungssystems innerhalb des baulogistischen Planungsprozesses hat entsprechend dem Grundsatz der frühzeitigen Initiierung einer Fachplanung Baulogistik bereits in den frühen Planungsphasen zu erfolgen. Im Kontext der Initiierungsphase des Projekts bedeutet dies, dass die vorhandene Ausgangslage sowie die baulogistischen Anfangsparameter und Einflussgrößen hinsichtlich einer projektspezifischen Eignung und Anwendung des Baustellenversorgungssystems zu analysieren sind. Das entwickelte Baustellenversorgungssystem ist grundsätzlich besonders geeignet für Bauprojekte mit einer hohen baulogistischen Komplexität, da es eben diese reduzieren kann. Um die Potenziale dieser Komplexitätsreduzierung beurteilen zu können, ist weiterführend zur primären Analyse und Bewertung der Baulogistikattribute eine weitere projektspezifische Analyse durchzuführen. Hierzu sind die Baulogistikattribute und die damit verbundenen Projekteigenschaften dahingehend zu analysieren und zu bewerten, inwiefern der Einsatz des Baustellenversorgungssystems eine positive Auswirkung auf die Komplexität der Baulogistikattribute hat und die ursprüngliche Komplexität somit reduziert werden kann. Als Unterstützung zur projektspezifischen Analyse und Beurteilung, ob ein Bauprojekt für das entwickelte Baustellenversorgungssystem geeignet ist, die ursprüngliche Komplexität dadurch reduziert werden kann und daher in den weiteren Planungsphasen zu berücksichtigen ist, werden im Folgenden die im Baulogistikprozessmodell identifizierten und bereits dargestellten Baulogistikattribute vor dem Hintergrund einer Anwendung des Baustellenversorgungssystems analysiert.

Das Baulogistikattribut *Transport* ist im Kontext der projektspezifischen Analyse und Beurteilung, ob ein Bauprojekt für das entwickelte Baustellenversorgungssystem geeignet ist, von besonderer Relevanz. Das Baustellenversorgungssystem sollte in den weiteren Planungspha-

⁷²⁴ Vgl. Ruhl et al. (2018): Baulogistikplanung, S. 13

sen Berücksichtigung finden, wenn innerhalb der projektspezifischen Analyse und Beurteilung des Baulogistikattributs *Transport* u. a. festgestellt wird, dass in unmittelbarer Nähe der Baustelle die umgebende Verkehrsinfrastruktur sowie die Verkehrssituation und somit die Verkehrsströme bspw. durch ein hohes Verkehrsaufkommen oder durch eine eingeschränkte Verkehrsführung auf Grund enger und kleiner Straßen als kritisch und komplex zu bewerten sind. Dies ist bspw. der Fall, wenn auf Grund der Verkehrsführung Rangierprozesse der Lieferfahrzeuge nötig sind, um auf die Baustelle ein- oder ausfahren zu können. Daher sind zur Bewertung der Verkehrsführung die Schleppkurven der Lieferfahrzeuge mit den örtlichen Gegebenheiten abzugleichen. Durchgeführte Untersuchungen^{725, 726} zeigen, dass durch Rangierprozesse der Lieferfahrzeuge außerhalb des Projektraums die Verkehrsströme beeinträchtigt werden. Es konnten exemplarische Staulängen von 150 m respektive Wartezeiten von bis zu 10 Minuten beobachtet werden, die auf die Prozesse der Baustellenanlieferung zurückzuführen sind. Neben den Schleppkurven sind auch die Anlieferungen pro Stunde sowie pro Baustellenzufahrt zu ermitteln. Es ist zum einen zu untersuchen, ob deren Anzahl innerhalb des Projektraums aufgenommen werden kann und zum anderen, ob durch dieses Verkehrsaufkommen die Verkehrsinfrastruktur außerhalb des Projektraums überlastet wird. Hierzu sind die Verkehrsströme vor Projektbeginn (Bestandsverkehre) aufzunehmen und mit dem prognostizierten Verkehrsaufkommen resultierend aus den Baustellenprozessen (Baustellenverkehre) zu überlagern und zu bewerten. Die Beurteilung der betroffenen Strecken und Knotenpunkte sowie deren mögliche Mehrbelastung können sich dabei an den sechs Qualitätsstufen gemäß des Handbuchs für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. orientieren. Auf Basis der Verkehrsanalyse kann sich eine Priorisierung der Verkehre als zielführend erweisen. Notfallverkehre haben hierbei die höchste Priorität, Baustellen- und Anliegerverkehre eine mittlere Priorität und Durchgangsverkehre die niedrigste Priorität. Als Ergebnis der Verkehrsanalyse kann es empfehlenswert sein, bspw. Durchgangsverkehre einzuschränken und hierdurch die Qualitätsstufe zu beeinflussen. Neben den Ergebnissen der angesprochenen Verkehrsanalysen sollte das Baustellenversorgungssystem in den weiteren Planungsphasen berücksichtigt werden, wenn die Anzahl der Anlieferungsstellen gering ist und darüber hinaus keine Warteflächen in unmittelbarer Nähe der Baustelle generiert werden können. Bei der Analyse und Beurteilung der Transportwege sollten deren Länge und Dauer und somit auch der Ausgangspunkt der Lieferungen untersucht werden. Das bei der direkten Baustellenanlieferung vorhandene Risiko von Verspätungen und Verzögerungen kann durch den Einsatz des Baustellenversorgungssystems verringert werden. Das Baustellenversorgungssystem sollte daher in

⁷²⁵ Vgl. Isikgel (2021): Eine Untersuchung zur Leistungsfähigkeit von Baustellenzufahrten und deren Auswirkung auf die unmittelbare verkehrliche Umgebung

⁷²⁶ Vgl. Koszyk (2019): Eine Untersuchung zu Auswirkungen von Baustellenzufahrten auf die unmittelbare verkehrliche Umgebung

den weiteren Planungsphasen berücksichtigt werden, wenn die Zuverlässigkeit der Anlieferungen auf Grund der Transportwege als problematisch beurteilt wird. Des Weiteren sind in diesem Zusammenhang die projektspezifischen Anforderungen an die Lieferzuverlässigkeit zu überprüfen, die sich aus der Anlieferungsstrategie bspw. durch eine JIT-Anlieferung ergeben und durch das Baustellenversorgungssystem erfüllt werden könnten. Ebenso sollte das Baustellenversorgungssystem in der Planung weiter verfolgt werden, wenn durch die Anzahl der Gewerke und deren gleichzeitige Leistungserbringung oder durch eine Materialvielfalt eine Vielzahl an Lieferanten und Anlieferungen zu erwarten sind und diese zu einer Überlastung der Baustellenzufahrten führen könnten. Innerhalb des Baulogistikattributs *Transport* werden auch die Emissionen sowie weitere Einschränkungen und Auswirkungen aus dem Transportprozess auf betroffene Dritte untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen können in Verbindung mit der Analyse und Beurteilung der Verkehrssituation als Indikator dienen, inwiefern behördliche Vorgaben im Zuge des Genehmigungsprozesses im Kontext dieser Aspekte zu erwarten sind. Das Baustellenversorgungssystem stellt eine Möglichkeit dar, diese behördlichen Vorgaben zu erfüllen und sollte daher für diese Fälle Teil der weiteren Planungsphasen sein.

Das Baulogistikattribut *Flächenmanagement* ist ebenso wie das Baulogistikattribut *Transport* für die projektspezifische Analyse und Beurteilung, ob ein Bauprojekt für das entwickelte Baustellenversorgungssystem geeignet ist, von besonderer Relevanz. Bei beengten Platzverhältnissen und unzureichender Lagerfläche auf dem Baustellengelände sowie im Falle benötigter Vorfertigungsflächen sollte das Baustellenversorgungssystem in den weiteren Planungsphasen Berücksichtigung finden. Durch den Einsatz des Baustellenversorgungssystems wird die Flächenverfügbarkeit des Bauprojekts erhöht. Die Aspekte Platzverhältnisse und Lagerflächen auf dem Baustellengelände werden umso relevanter und herausfordernder, umso mehr Gewerke gleichzeitig auf der Baustelle tätig sind und somit die Anzahl an Anlieferungen sowie der Lagerflächenbedarf steigen.

Das Baulogistikattribut *Sicherheit und Schutzleistungen* ist bei der projektspezifischen Analyse und Beurteilung, ob ein Bauprojekt für das entwickelte Baustellenversorgungssystem geeignet ist, insbesondere für den Fall von Relevanz und zu untersuchen, wenn mit erhöhten Anforderungen oder Einschränkungen im Rahmen der Baustellenzufahrt zu rechnen ist. Diese erhöhten Anforderungen oder Einschränkungen können sich bspw. bei Bauprojekten innerhalb von Industrieanlagen und Werksgeländen oder anderen besonders schutzbedürftigen Infrastrukturen ergeben. Durch das Baustellenversorgungssystem in Verbindung mit einem standardisierten Anlieferungsprozess über einen Routenverkehr erfolgt die Baustellenzufahrt stets mit demselben Personal und denselben Fahrzeugen. Den o. g. erhöhten Anforderungen im Rahmen der Baustellenzufahrt kann somit entsprochen werden. Des Weiteren kann im Zuge dessen der Prüfungs- und Genehmigungsaufwand hinsichtlich jeder einzelnen Baustellenanlieferung im Kontext der projektspezifischen Sicherheitsaspekte verringert werden.

Das Baulogistikattribut *Abfallbewirtschaftung* ist, bezogen auf die projektspezifische Analyse und Beurteilung, ob ein Bauprojekt für das entwickelte Baustellenversorgungssystem geeignet ist, dahingehend relevant, dass durch die Entsorgungsprozesse die Anzahl der Transporte steigt und somit das Baulogistikattribut *Abfallbewirtschaftung* einen unmittelbaren Einfluss auf das Baulogistikattribut *Transport* und auf die diesbezüglich beschriebenen Herausforderungen besitzt. Es ist zu untersuchen, inwiefern die innerhalb des Baustellenversorgungssystems eingesetzten Fahrzeuge die Abfallentsorgung durchführen können. Durch die Integration des Baustellenversorgungssystems in die Baustellenentsorgungsprozesse könnten Synergien realisiert und Leerfahrten der eingesetzten Fahrzeuge reduziert werden. Die Infrastruktur des Baustellenversorgungssystems könnte als zentrale Abfallsammelstelle oder Wertstoffhof sowie als Übergabeort für die Entsorgungsunternehmen fungieren.

Die Baulogistikattribute *Containermanagement* und *Baugeräte* sind hinsichtlich der projektspezifischen Analyse und Beurteilung, ob ein Bauprojekt für das entwickelte Baustellenversorgungssystem geeignet ist, von untergeordneter Relevanz. Es ist jedoch anzumerken, dass durch die Flächenbedarfe der Containeranlagen und der Baugeräte die möglichen Lager- und Vorfertigungsflächen eingeschränkt werden und somit die Baulogistikattribute *Containermanagement* und *Baugeräte* einen unmittelbaren Einfluss auf das Baulogistikattribut *Flächenmanagement* und auf die diesbezüglich beschriebenen Herausforderungen besitzen.

Das Baulogistikattribut *Organisation und Information* besitzt im Kontext der projektspezifischen Analyse und Beurteilung, ob ein Bauprojekt für das entwickelte Baustellenversorgungssystem geeignet ist, zunächst eine untergeordnete Relevanz. Die Anwendung des entwickelten Baustellenversorgungssystems geht jedoch mit der Empfehlung einher, ein digitales Warenwirtschaftssystem in Verbindung mit dem dargestellten polysensoralen System innerhalb des Baustellenversorgungssystems einzuführen. Hierdurch ergibt sich bei einer singulären Betrachtung des Baulogistikattributs *Organisation und Information* eine erhöhte Komplexität im Vergleich zur primären Analyse und Bewertung der Baulogistikattribute. Es ist jedoch zu konstatieren, dass die bereits dargelegten Vorteile und Potenziale, die sich durch ein digitales Warenwirtschaftssystem und das polysensorale System ergeben, zu einer Reduzierung der baulogistischen Gesamtkomplexität führen können.

Die Baulogistikattribute *Medienversorgung* und *sonstige baulogistische Leistungen* sind bei der projektspezifischen Analyse und Beurteilung, ob ein Bauprojekt für das entwickelte Baustellenversorgungssystem geeignet ist, von untergeordneter Relevanz. Die ursprüngliche Komplexität dieser Baulogistikattribute wird durch die Anwendung des Baustellenversorgungssystems nicht wesentlich verändert oder beeinflusst.

Das Vorgehen zur methodischen Auswertung und zur projektspezifischen Analyse und Beurteilung der Baulogistikattribute und damit verbunden die Entscheidung, ob ein Bauprojekt für das entwickelte Baustellenversorgungssystem geeignet ist, werden bewusst offen gelassen. Es erscheint zielführender, die Entscheidung hinsichtlich des konkreten Vorgehens und

der verwendeten Methodik zur Bewertung, dem individuellen Anwender zu überlassen respektive abhängig von unternehmenseigenen Kompetenzen zu wählen. Die Auswahl der Methodik als auch die Analyse und Beurteilung sind seitens des Anwenders zu begründen und sach- und fachgerecht durchzuführen. Die vor dem Hintergrund einer möglichen Anwendung des Baustellenversorgungssystems analysierten, diskutierten und dargestellten Baulogistikattribute dienen hierzu als Entscheidungshilfe und -grundlage. Die innerhalb der Baulogistikattribute genannten Merkmale und Beispiele sollen den Anwender sensibilisieren und als Richtschnur dafür dienen, bei welchen Bauprojekten das entwickelte Baustellenversorgungssystem im weiteren Planungsprozess weiterverfolgt werden sollte. Eine hohe Übereinstimmung der genannten Merkmale und Beispiele mit dem individuellen Bauprojekt lassen grundsätzlich auf ein hohes Potenzial zur o. g. Reduzierung der ursprünglichen baulogistischen Komplexität durch den Einsatz des Baustellenversorgungssystems schließen. Bei singulären Übereinstimmungen der genannten Merkmale und Beispiele mit dem individuellen Bauprojekt sollten andere baulogistische Lösungen wie bspw. die in Kapitel 2.2.2 geschilderte Bildung von Teilsystemen weiterverfolgt werden. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass hinsichtlich der Initiierung des Baustellenversorgungssystems der Fokus auf der projektindividuellen Analyse und Beurteilung der Baulogistikattribute Transporte, Flächenmanagement sowie Sicherheit und Schutzleistungen liegt, jedoch eine Initiierung des Baustellenversorgungssystems im Einzelfall auch auf Grund anderer Baulogistikattribute oder Aspekte, die bspw. die Versorgungsinfrastruktur, die Entsorgungsinfrastruktur oder die Nachhaltigkeit betreffen, sinnvoll sein kann.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass oftmals die Projektgröße, dessen Standort oder die Bauzeit als direkter Einflussfaktor bezüglich der vorhandenen baulogistischen Komplexität genannt werden und anhand dieser Aspekte die baulogistische Komplexität abgeleitet werden kann. Nach Ansicht des Verfassers der vorliegenden Arbeit müssen die o. g. Einflussfaktoren aber differenzierter und im Gesamtzusammenhang betrachtet werden. Ein großes Projekt oder ein Projekt im urbanen Raum ist bspw. nicht per se baulogistisch komplex. Vielmehr beeinflussen die Projektgröße, der Projektstandort und die Bauzeit die Analyse und Beurteilung aller Baulogistikattribute. Dieser Aspekt verdeutlicht wiederum die Notwendigkeit einer projektindividuellen Analyse der baulogistischen Komplexität.

Neben der frühzeitigen Initiierung des Baustellenversorgungssystems sind weitere Möglichkeiten und Ansätze zur Integration des Baustellenversorgungssystems in das baulogistische Netzwerk zu konstatieren, die nicht über die baulogistische Komplexität und somit nicht vollumfänglich über das Baulogistikprozessmodell abgebildet und betrachtet werden können. Diese Möglichkeiten und Ansätze werden daher nicht intensiver untersucht, sollten der Vollständigkeit halber trotzdem erwähnt werden. Eine dieser Möglichkeiten ist, dass die Integration des entwickelten Baustellenversorgungssystems im Zuge des Planungsprozesses Vorgabe

der zuständigen Genehmigungsbehörde wird respektive Ergebnis des Genehmigungsprozesses ist oder die Bauherrschaft erst im fortgeschrittenen Planungsprozess, also nach der Initiierungsphase bspw. durch veränderte oder sich konkretisierende Randbedingungen die Einbindung des Baustellenversorgungssystems fordert. Eine weitere, denkbare Möglichkeit ist die Integration des Baustellenversorgungssystems in der Ausführungsphase. Diese Integrationsmöglichkeit kann sich ergeben, wenn erst während der Leistungserstellung ersichtlich wird, dass zur Sicherstellung der Produktionsprozesse auf der Baustelle das entwickelte Baustellenversorgungssystem eingesetzt werden sollte. Dieses Vorgehen ist zu vermeiden und resultiert aus einer fehlenden oder unzureichenden Baulogistikplanung in den frühen Projektphasen. Ebenso ist eine Integration in der Ausführungsphase denkbar, um zu erwartenden Preissteigerungen und Lieferschwierigkeiten durch den Aufbau eines Lagerbestandes entgegenzuwirken und somit die kosten- und termingerechte Leistungserstellung sicherzustellen. Die Einbindung des Baustellenversorgungssystems in der Ausführungsphase kann darüber hinaus auch durch eine intrinsische Motivation respektive durch den Innovationswillen seitens eines ausführenden Unternehmens, also als visionäres Unternehmensziel, begründet werden. All diese Möglichkeiten und Ansätze zur Integration des Baustellenversorgungssystems stellen jedoch suboptimale Ansätze dar, da die Einbindung nicht zum frühestmöglichen Zeitpunkt erfolgt und somit nicht während des gesamten Planungsprozesses berücksichtigt werden kann.

Zur Veranschaulichung der analysierten, diskutierten und dargestellten Baulogistikattribute sowie der Notwendigkeit einer projektindividuellen Analyse und Bewertung werden abschließend vereinfachte, plastische Projektbeispiele respektive Projektprofile aufgeführt, die für eine Anwendung des Baustellenversorgungssystems besonders geeignet scheinen:

- „Urbaner Raum“: Bauprojekt im innerstädtischen Raum einer Großstadt mit bspw. einer komplexen Verkehrsinfrastruktur innerhalb der Baustellenumgebung, einer geringen Anzahl an Anlieferungsstellen und Warteflächen, hohen Anforderungen an die Lieferzuverlässigkeit durch bspw. die Anwendung von JIT-Anlieferungen oder Methoden der Lean Construction, einer hohen Anzahl an Gewerken und Transporten verbunden mit einer gleichzeitigen Leistungserbringung, geringen Lagerflächen und beengten Platzverhältnissen sowie zu erwartenden behördlichen Auflagen bezüglich Aspekten der Nachhaltigkeit und des Emissionsschutzes.
- „Insel“: Bauprojekt auf einer Insel mit bspw. einer eingeschränkten verkehrlichen Erreichbarkeit und damit verbunden komplexen Transportwegen sowie hohen Anforderungen an die Transportplanung und die Lieferzuverlässigkeit.
- „Industrie“: Bauprojekt innerhalb des Werkgeländes eines Chemiekonzerns mit bspw. erhöhten Sicherheitsanforderungen hinsichtlich der Umgebung und der Infrastruktur

der Industrieanlagen sowie damit verbundenen Restriktionen bezüglich der Baustellenzufahrt und dem internen Werksverkehr.

- „Bauen im Bestand“: Bauprojekt während des laufenden Betriebs eines Einkaufszentrums mit bspw. komplexen Ver- und Entsorgungsströmen der Baustelle und gleichzeitigem Publikumsverkehr, einer geringen Anzahl an Anlieferungsstellen und Warteflächen, hohen Anforderungen an die Liefertreue sowie geringen Lagerflächen und beengten Platzverhältnissen.

Die Baulogistikinitiiierungsphase und somit auch die Entscheidung über eine Initiierung und mögliche spätere Realisierung des entwickelten Baustellenversorgungssystems werden durch den Baulogistikbericht dokumentiert. Wenn die projektindividuelle Analyse und Bewertung zeigt, dass das Baustellenversorgungssystem Teil des weiteren Planungsprozesses sein sollte, ist dies im Baulogistikbericht festzuhalten. Der Baulogistikbericht hat für diesen Fall neben den üblichen Inhalten (Dokumentation der Basisparameter des Bauprojekts, Dokumentation der baulogistischen Einflussgrößen, Dokumentation der bauherrenseitigen Baulogistikzielsetzung, Selektion, Definition und Analyse der Baulogistikattribute sowie Darstellung der baulogistischen Komplexität)⁷²⁷ im Rahmen der Zusammenfassung und den Empfehlungen zum weiteren Vorgehen u. a. auch Aussagen zum spezifischen Leistungsumfang sowie zu den einzubindenden Beteiligten des Baustellenversorgungssystems zu treffen und die Entscheidungen hinsichtlich der Initiierung des Baustellenversorgungssystems zu begründen. Das Baustellenversorgungssystem kann in diesem Kontext als bauliche Vorabmaßnahme definiert werden, die einem Planungsprozess zu unterwerfen ist. Hierzu ist eine Baulogistikfachplanung einzurichten. Die Auswirkungen des entwickelten Baustellenversorgungssystems auf diesen Planungsprozess und damit verbunden auf das Baulogistikkonzept werden im folgenden Kapitel dargelegt. Die nachfolgende Abbildung zeigt zusammenfassend die wesentlichen Aspekte und Prozesse hinsichtlich der Initiierung des Baustellenversorgungssystems.

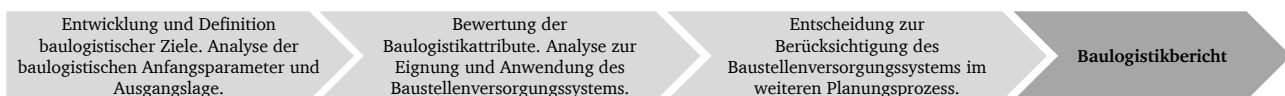


Abbildung 79: Baustellenversorgungssystem – Initiierung⁷²⁸

Im Kontext der Baulogistikinitiiierungsphase ist darauf hinzuweisen, dass bei der Formulierung der baulogistischen Zielsetzung explizit die Nachhaltigkeit berücksichtigt werden sollte. Dementsprechend sollten bei der Analyse und Bewertung der Baulogistikattribute sowie bei der Beurteilung, inwiefern das Baustellenversorgungssystem im weiteren Planungsprozess berücksichtigt wird, die Auswirkungen auf die Nachhaltigkeit im Fokus stehen. Als Basis für

⁷²⁷ Vgl. Ruhl et al. (2018): Baulogistikplanung, S. 19

⁷²⁸ Eigene Darstellung

die Formulierung der nachhaltigen bauphysikalischen Zielsetzung als auch für die Nachhaltigkeitsanalyse und Bewertung der Bauphysikattribute sowie die Beurteilung des Baustellenversorgungssystems können die Regelungen zur Nachhaltigkeitsberichterstattung sowie die Kriterienkataloge und Bewertungsrichtlinien der Zertifizierungssysteme dienen.

5.2 Baustellenversorgungssystem – Planung

Der Prozess der Baulegistikplanung wird durch das Baulegistikkonzept dokumentiert. Für die Erstellung des Baulegistikkonzepts wird ein phasenweises Vorgehen in Anlehnung an die HOAI-Leistungsphasen empfohlen. Zunächst werden mit dem Objektplaner sowie auf Basis des Baulegistikberichts die für die baulegistische Grundlagenermittlung resultierenden Leistungen analysiert und geklärt. Hierzu zählen u. a. die Definition des Abwicklungskonzepts und der dazu notwendigen Organisationen sowie die Mitwirkung bei der Erstellung des projektbezogenen Rahmenterminplans. Anschließend erfolgt die baulegistische Vor- und Entwurfsplanung. Diese beinhalten erste Maßnahmen zur baulegistischen Vorbereitung der Produktionsprozesse sowie Visualisierungen zur zeitlichen Entwicklung des Baustellenareals. Als dokumentiertes Ergebnis dieser Planungsphase wird eine erste Fassung des Baustellenordnungsplans erstellt. Abschließend werden die Genehmigungsplanung und deren Schnittstellen zur Baulegistik betrachtet. Bei komplexen baulegistischen Projekten wird für die Erteilung der Baugenehmigung immer häufiger ein Baulegistikkonzept, welches für alle Projektbeteiligten verbindlich ist, erforderlich. Das Baulegistikkonzept dokumentiert in Analogie zum Baulegistikbericht die Grunddaten und beinhaltet zusätzlich die erarbeiteten baulegistischen Handlungsempfehlungen in Verbindung mit der Definition der baulegistischen Elemente des Projektraums, die Festlegungen zu den notwendigen Organisationsstrukturen für die Durchführung der baulegistischen Prozesse sowie die Definitionen zu den erforderlichen Infrastrukturelementen. Durch die Erstellung des Baulegistikkonzepts wird der Prozess der Baulegistikplanung abgeschlossen.⁷²⁹ Im Folgenden werden die innerhalb der verschiedenen Leistungsphasen genannten Aspekte sowie die damit verbundenen Planungsaufgaben (u. a. Durchführung Geräte-, Personen- und Materialflussanalysen, Entwicklung adäquater Baulegistikketten, Entwicklung baulegistischer Lösungsvarianten und methodisch begründete Variantenauswahl, Ermittlung Baulegistikkosten) vor dem Hintergrund einer Anwendung des Baustellenversorgungssystems diskutiert und gemäß den HOAI-Leistungsphasen gegliedert.

In der Leistungsphase 1 „Grundlagenermittlung“ entstehen auf Basis des Baulegistikberichts respektive durch die darin formulierte Empfehlung zur Integration des Baustellenversorgungssystems zunächst zusätzliche Baulegistikfachplanungsleistungen und im weiteren Verlauf zusätzliche Baulegistikausführungsleistungen. Diese zusätzlichen Leistungen sind zu analysieren und in das Abwicklungskonzept aufzunehmen. Durch die Integration des Baustellenversorgungssystems erhöht sich die Anzahl der zu beteiligenden Personen und Organisationen und dementsprechend die Anzahl an baulegistischen Schnittstellen. Zu den zusätzlich zu beteiligenden Personen und Organisationen können u. a. Fachplaner und Betrei-

⁷²⁹ Vgl. Ruhl et al. (2018): Baulegistikplanung, S. 23 ff.

ber des Baustellenversorgungssystems und damit verbunden mögliche Lieferanten, Speditionen oder Baulogistikdienstleister sowie Anbieter von Warenwirtschaftssystemen zählen. Diese zusätzlich zu beteiligten Personen und Organisationen sind projektspezifisch zu erfassen und zum entsprechenden Zeitpunkt in die Baulogistikfachplanung zu integrieren. Innerhalb des projektbezogenen Rahmenterminplans sind die sich auf Grund einer möglichen Realisierung des Baustellenversorgungssystems ergebenden zusätzlich zu erbringenden Leistungen abzubilden. Hierzu zählen u. a. alle nötigen Vorabmaßnahmen zur Planung und Errichtung der physischen Infrastruktur des Baustellenversorgungssystems. Dies kann in Abhängigkeit zur realen Ausgestaltung und Ausprägung der physischen Infrastruktur und deren Randbedingungen neben einer erweiterten Baulogistikfachplanung auch zusätzliche Objektplanungs- und spezifische Fachplanungsleistungen erfordern.

In den Leistungsphasen 2 „Vorplanung“ und 3 „Entwurfsplanung“ erfolgen die o. g. Flussanalysen sowie die Entwicklung verschiedener Varianten und deren methodisch begründete Auswahl. In dieser Planungsphase sollten als baulogistische Lösungsvarianten sowohl Ansätze verfolgt und miteinander verglichen werden, die eine Integration des Baustellenversorgungssystems beinhalten als auch solche Ansätze, die eine Integration des Baustellenversorgungssystems ausschließen. Darüber hinaus sind die unterschiedlichen Realisierungsmöglichkeiten der physischen Infrastruktur des Baustellenversorgungssystems durch verschiedene Varianten abzubilden. Grundsätzlich sind in diesem Kontext Varianten denkbar, bei denen die physische Infrastruktur des Baustellenversorgungssystems entweder innerhalb der existierenden Infrastruktur eines Projektbeteiligten, auf der Baustelle selbst oder auf einer externen Fläche angesiedelt ist. Eine Klärung hinsichtlich der entsprechenden Flächenverfügbarkeiten sowie die Suche und Auswahl von externen Flächen hat im Zuge der Entwicklung der baulogistischen Lösungsvarianten zu erfolgen. Hierzu sind der benötigte Flächenbedarf respektive die erforderliche Kapazität des Baustellenversorgungssystems zunächst überschlägig zu ermitteln und im weiteren Verlauf durch die Ergebnisse der Materialflussprognosen und -analysen zu präzisieren. Bei der Verortung der Infrastruktur bei einem Projektbeteiligten, wie bspw. dem Bauhof eines Bauunternehmens oder den Lagerflächen eines Baustoffhändlers, ist es empfehlenswert, dass dieser Projektbeteiligte gleichzeitig als Betreiber des Baustellenversorgungssystems fungiert. Des Weiteren sollten bei der Nutzung einer externen Fläche Varianten mit unterschiedlichen Standorten erstellt und miteinander verglichen werden.

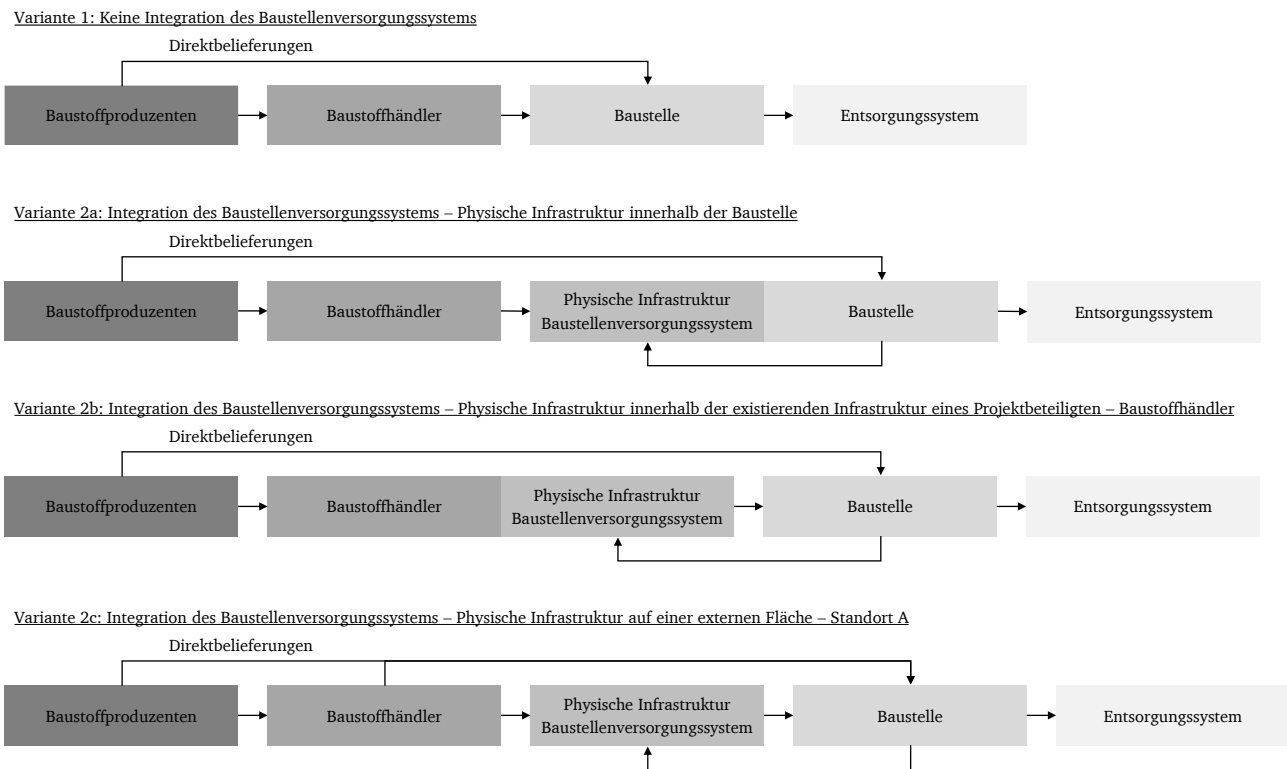


Abbildung 80: Baulogistische Lösungsvarianten⁷³⁰

Die unterschiedlichen baulogistischen Lösungsvarianten implizieren, wie in Abbildung 80 dargestellt, unterschiedliche Baulogistikketten und sind den o. g. Flussanalysen zu unterziehen, um kollisionsfreie und geeignete Baulogistikketten hinsichtlich möglicher geometrischer oder kapazitiver Zwangspunkte sicherzustellen.⁷³¹ Vor dem Hintergrund des entwickelten Baustellenversorgungssystems liegt der weitere Fokus auf den durchzuführenden Materialflussanalysen und den damit verbundenen gewerkeweisen Materialflussprognosen. Hierzu ist gewerkeweise sowie materialspezifisch zu prüfen und zu entscheiden, ob ein bestimmtes Material direkt zur Baustelle geliefert wird oder ob die Anlieferung über die physische Infrastruktur des Baustellenversorgungssystems erfolgt. Des Weiteren ist in diesem Zuge zu analysieren, inwiefern die Anlieferung über die physische Infrastruktur des Baustellenversorgungssystems sowohl aus baulogistischer als auch aus ausführungstechnischer Perspektive positive Auswirkungen besitzt. Diese materialspezifischen Entscheidungen und Analysen sind im engen Austausch zwischen der Baulogistikfachplanung und den gewerkespezifischen Fachplanungsinstanzen durchzuführen und abzusprechen. Als Unterstützung und Input für diesen Entscheidungsprozess werden im Folgenden verschiedene Aspekte und Faktoren benannt und diskutiert, die bei der Entscheidungsfindung zu berücksichtigen sind. Hierzu zäh-

⁷³⁰ Eigene Darstellung

⁷³¹ Vgl. Ruhl (2016): Entwicklung eines Baulogistikprozessmodells, S. 142

len der Aggregatzustand, die Verarbeitbarkeit respektive die Lagerfähigkeit und das Transportmittel der Materialien sowie der tägliche Materialbedarf in Verbindung zur Transportmittelauslastung. Des Weiteren werden die in der Materialwirtschaft angewendeten und in Kapitel 3.2.2 beschriebenen Methoden zur Materialklassifizierung respektive Auswahl der Beschaffungsstrategie berücksichtigt und in den Entscheidungsprozess integriert.

- **Aggregatzustand:** Der Aggregatzustand der Materialien hat einen Einfluss auf die Art und die Beschaffenheit der Transport- und Lagereinheit und somit auf die material-spezifische Entscheidung, inwiefern das Material für das Baustellenversorgungssystem geeignet ist. Flüssige und gasförmige Materialien sind für eine Anlieferung über die physische Infrastruktur des Baustellenversorgungssystems geeignet, wenn sie entsprechend verpackt sind und somit als Stückgut betrachtet und gehandhabt werden können. Selbiges gilt für die, zwischen Schüttgut und Stückgut zu differenzierenden, festen Materialien. Verpackte Schüttgüter können als Stückgut betrachtet und entsprechend gehandhabt werden und sind daher für eine Anlieferung über die physische Infrastruktur des Baustellenversorgungssystems geeignet. Unverpackte Schüttgüter sowie flüssige und gasförmige Materialien, die in speziellen Behältern gelagert werden oder spezielle Transportmittel erfordern, eignen sich u. a. auf Grund der aufwändigen Umschlagprozesse nicht für eine Anlieferung über die physische Infrastruktur des Baustellenversorgungssystems.
- **Verarbeitbarkeit und Lagerfähigkeit:** Materialien, die unmittelbar nach ihrer Herstellung zu verarbeiten und somit nicht lagerfähig sind, eignen sich nicht für eine Anlieferung über die physische Infrastruktur des Baustellenversorgungssystems.
- **Transportmittel:** Materialien, die spezielle Transportmittel oder Transportmittel mit Sonderaufbauten benötigen, sind für eine Anlieferung über die physische Infrastruktur des Baustellenversorgungssystems ungeeignet. Dies ist zum einen damit zu begründen, dass solche Transportmittel nicht zur Standardressource des Baustellenversorgungssystems gehören und diese Materialien zum anderen durch das Erfordernis spezieller Transportmittel aufwändige Umschlagprozesse implizieren.
- **Materialbedarf:** Materialien, die bei der Anlieferung des auf der Baustelle benötigten Tagesbedarfs zu einer vollständigen Auslastung des Transportmittels führen, sollten JIT direkt zur Baustelle geliefert werden. Für diesen Fall ist eine ausreichende Lagerfläche im entsprechenden Takt- oder Arbeitsbereich sicherzustellen ohne die Ausführungsprozesse zu behindern. Sollte dies nicht gewährleistet werden können, ist auch hier eine hochfrequentierte, mehrmals tägliche Anlieferung über die physische Infrastruktur des Baustellenversorgungssystems anzustreben.
- **ABC-Analyse:** Die Analyse zu den Wert-Mengenverhältnissen der Materialien erlaubt keine direkte Aussage zur materialspezifischen Entscheidung, inwiefern ein Material

für das Baustellenversorgungssystem geeignet oder nicht geeignet ist und ist daher mit den weiteren Analysen zu kombinieren.

- XYZ-Analyse: Die Analyse zur Verbrauchsstruktur und damit verbunden zur Vorhersagegenauigkeit der Materialien erlaubt keine direkte Aussage zur materialspezifischen Entscheidung, inwiefern ein Material für das Baustellenversorgungssystem geeignet oder nicht geeignet ist und ist daher mit den weiteren Analysen zu kombinieren. Es ist jedoch anzumerken, dass Materialien mit einem unregelmäßigen Bedarf und geringer Vorhersagegenauigkeit (Z-Materialien) auf Grund einer entsprechenden Planungstiefe idealerweise nicht vorkommen und zu vermeiden sind. Der spontane Bedarf eines Z-Materials sollte durch eine Beschaffung im Bedarfsfall sowie einer JIT-Anlieferung direkt zur Baustelle gedeckt werden. Ein schwankender Materialbedarf mit einer mittleren Vorhersagegenauigkeit (Y-Materialien) sollte zwar durch eine entsprechende Planungstiefe ebenfalls vermieden werden, kann jedoch durch das Baustellenversorgungssystem bis zu einem gewissen Maße aufgenommen werden.
- GMK-Analyse: Die Analyse zu den Dimensionen und den Volumina der Materialien unterstützt direkt die materialspezifische Entscheidung, inwiefern ein Material für das Baustellenversorgungssystem geeignet oder nicht geeignet ist. Die Geometrie der Materialien muss mit den Prozessen innerhalb des Baustellenversorgungssystems kompatibel sein und sollte die Verwendung von standardisierten Förderhilfsmitteln ermöglichen und unterstützen. Großvolumige Materialien können zum einen aufwändige TUL- sowie Kommissionierprozesse bedeuten und eine Konsolidierung mit anderen Materialien erschweren oder verhindern sowie zum anderen zur o. g. vollständigen Auslastung des Transportmittels bei der Anlieferung des benötigten Tagesbedarfs führen. Daher sind für die beschriebenen großvolumigen Materialien JIT-Anlieferungen direkt zur Baustelle zu realisieren. Großvolumige Materialien mit einem regelmäßigen Bedarf und einer hohen Vorhersagegenauigkeit (XG-Materialien) erlauben dabei eine gute Planbarkeit sowie eine zielsichere Umsetzung von JIT-Anlieferungen. Klein- und mittelvolumige sowie großvolumige Materialien, die nicht zur vollständigen Auslastung des Transportmittels führen und eine Handhabung innerhalb der physischen Infrastruktur des Baustellenversorgungssystems erlauben, sollten nicht direkt zur Baustelle geliefert werden. Eine Ausnahme bilden kleinvolumige und kleinteilige Materialien mit einem geringen Wert-Mengenverhältnis (CK-Materialien) in Form von Lagerprodukten respektive Hilfs- und Betriebsstoffe, die direkt zur Baustelle geliefert und hier nach dem Supermarkt-Prinzip gelagert und bereitgestellt werden sollten.

Anhand einer materialspezifischen Analyse zu den erläuterten und diskutierten Aspekten und Faktoren kann entschieden werden, inwiefern ein bestimmtes Material für die Anlieferung über die physische Infrastruktur des Baustellenversorgungssystems geeignet oder nicht ge-

eignet ist. Hierdurch kann die durchzuführende Materialflussanalyse und die damit verbundene gewerkeweise Materialflussprognose unterstützt werden. In Tabelle 11 sind für das Baustellenversorgungssystem beispielhaft geeignete und ungeeignete Materialien gezeigt. Diese Übersicht gibt einen groben Überblick und soll die o. g. Faktoren und Aspekte sowie die möglichen Ergebnisse des Entscheidungsprozesses veranschaulichen. Die Tabelle stellt demnach keine abschließende Bewertung hinsichtlich der Eignungsanalyse dar. Diese materialspezifische Analyse und Entscheidung ist, wie bereits beschrieben, seitens der Baulogistikfachplanung und den gewerkespezifischen Fachplanungsinstanzen projektindividuell durchzuführen.

Tabelle 11: Exemplarische Materialeignungsanalyse⁷³²

Material	Geeignet	Ungeeignet	Begründung
Bewehrung		X	XG-Material. Aufwändiger Umschlagprozess. Tagesbedarf führt typischerweise zu ausgelasteten Transportfahrzeugen.
Dachziegel Dämmung Eimerware - bspw. Farben oder Grundierungen Fliesen Heizkörper Kabel Mauerwerkssteine Rohrleitungen Rollenware - bspw. Bitumenbahnen oder Folien Sackware - bspw. Fliesenkleber oder Trockenmörtel Sanitärobjekte Trockenbauplatten und -profile Türen	X		Standardisiertes Förderhilfsmittel. Kommissionierung und Konsolidierung mit anderen Materialien sind ebenso wie die weiteren Prozesse im Baustellenversorgungssystem umsetzbar.
Dübel, Nägel, Schrauben		X	CK-Material. Direktanlieferung zur Baustelle und dort Bereitstellung nach dem Supermarktprinzip.
Fenster	X		Materialspezifisches Förderhilfsmittel. Kommissionierung und Konsolidierung mit anderen Materialien sind jedoch ebenso wie die weiteren Prozesse im Baustellenversorgungssystem umsetzbar.
Frischbeton		X	Material muss unmittelbar nach der Herstellung verarbeitet werden und ist daher nicht lagerfähig. Anlieferung erfolgt typischerweise durch Transportfahrzeuge mit Sonderaufbauten.
Stahlbetonfertigteile		X	XG-Material. Aufwändiger Umschlagprozess. Tagesbedarf führt typischerweise zu ausgelasteten Transportfahrzeugen. Bauteilgeometrien und -eigenschaften können Transportfahrzeuge mit Sonderaufbauten erfordern.

An dieser Stelle können exemplarisch die Wechselwirkungen und Schnittstellen zwischen der Baulogistikfachplanung und der Objekt- sowie Fachplanung veranschaulicht und deren Relevanz verdeutlicht werden. Einerseits kann eine Änderung oder Anpassung der Objekt- oder Fachplanung auf bspw. der Materialebene einen unmittelbaren Einfluss auf die Materialflussprognosen besitzen und somit eine Auswirkung auf die materialspezifische Entscheidung hinsichtlich der Nutzung der physischen Infrastruktur des Baustellenversorgungssystems haben. Hierdurch kann u. a. gezielt die Auslastung respektive die Größe des Baustellenversorgungssystems gesteuert und damit verbunden die spätere Beurteilung dieser baulogistischen Lösungsvariante beeinflusst werden. Andererseits ist das Baustellenversorgungssystem für seine

⁷³² Eigene Darstellung

vollumfängliche und zielführende Anwendung seitens der Objekt- und Fachplanung innerhalb des Planungsprozesses zu berücksichtigen. Das Baustellenversorgungssystem erfordert systemspezifische Planungsleistungen wie bspw. die Planung in einem digitalen Gebäudemodell zur Realisierung des angestrebten modellbasierten Abrufprozesses oder die Vorbereitung und Unterstützung seitens der Planungsinstanzen für eine produktionssynchrone, taktweise Materialdisposition auf Basis der Methoden der Lean Construction in der Ausführungsphase.

Grundsätzlich kann die Beurteilung der verschiedenen baulogistischen Lösungsvarianten mit Bezug zu den Baulogistikattributen erfolgen. Hierzu werden für jedes projektrelevante Baulogistikattribut die Auswirkungen, die aus den verschiedenen Lösungsvarianten resultieren, analysiert und beurteilt. Die Art und das Vorgehen zur methodischen Auswertung der verschiedenen baulogistischen Lösungsvarianten werden in Analogie zur projektspezifischen Analyse und Beurteilung der Baulogistikattribute im Rahmen der Baulogistikinitiierung und der in diesem Kontext dargelegten Argumentation wiederum bewusst offen gelassen. Ein mögliches Vorgehen ist die Analyse und Beurteilung der Lösungsvarianten über eine Variantenmatrix. Hierzu wird jede Variante nach projektspezifisch festzulegenden Bewertungskriterien wie bspw. Kostenrelevanz, Auswirkungen auf die Bauzeit, Flächenverbrauch, Umweltrelevanz, Flexibilität, Genehmigungsfähigkeit, Akzeptanz der Öffentlichkeit und der Anlieger⁷³³ oder auch Verkehrsbeeinflussung, Versorgungssicherheit und vorhandene Infrastruktur analysiert und beurteilt. Die Analyse und Beurteilung dieser Kriterien erfolgt dabei nicht global, sondern ist der Baulogistikattribute entsprechend untergliedert. Auf Basis der durchgeführten Flussanalysen sowie einer sach- und fachgerechten Variantenbeurteilung wird seitens der Auftraggeberschaft gemeinsam mit der Baulogistikfachplanung sowie weiteren Fachplanungsinstanzen die baulogistische Vorzugsvariante festgelegt und der Prozess der Vorplanung abgeschlossen. Für den Fall, dass eine Vorzugsvariante ausgewählt wird, die eine Integration des Baustellenversorgungssystems beinhaltet, resultieren hieraus weitere Planungsaufgaben, die im Folgenden erläutert werden und der Entwurfsplanung zuzuordnen sind.

Die Ressourcenplanung der Baustelle ist um die physische Infrastruktur des Baustellenversorgungssystems zu erweitern. Auf Grundlage der Flussanalysen und der Baulogistikette der Vorzugsvariante werden die erforderlichen Ressourcen und deren Kapazitäten sowohl für die Baustelle als auch für das Baustellenversorgungssystem geplant. Hierzu wird die im Zuge der Flussanalysen erstellte Vorplanung der Ressourcenplanung des Baustellenversorgungssystems präzisiert und in eine Entwurfsplanung überführt. Es ist projektindividuell zwischen Auftraggeberschaft und Baulogistikfachplanung abzustimmen und festzulegen, welche Aufgaben und Funktionen das Baustellenversorgungssystem übernehmen soll. Ausgehend von dieser Festlegung und den damit verbundenen Prozessen können die hierfür erforderlichen Ressourcen geplant und dimensioniert werden. Darüber hinaus ergeben sich in Abhängigkeit

⁷³³ Vgl. Ruhl (2016): Entwicklung eines Baulogistikprozessmodells, S. 144 f.

zu den in Abbildung 80 dargestellten Standortmöglichkeiten des Baustellenversorgungssystems verschiedene Ausprägungen der erforderlichen Infrastruktur und Ressourcen und somit ein sich differenzierender Planungsumfang. Dieser Planungsumfang kann sich von einer erweiterten Ressourcenplanung der Baustelle bis hin zu einer vollständigen Neuplanung einer Lagerhalle erstrecken. In diesem Kontext ist herauszustellen, dass die Baulogistikfachplanung baulogistische Aspekte plant und entsprechende Konzepte erarbeitet, jedoch nicht die erforderliche Objekt- oder Fachplanung baulogistischer Elemente, wie bspw. eine vollständige Neuplanung einer Lagerhalle mit u. a. deren technischer Ausrüstung und dessen Lagerlayout unter Berücksichtigung normativer, arbeitsschutzrechtlicher sowie weiterer relevanter Regularien, übernimmt. Zur Darstellung und Berücksichtigung zeitvariabler Aspekte der Ressourcenplanung ist das Baustellenversorgungssystem in die Generalterminplanung zu integrieren. Neben der Integration des Baustellenversorgungssystems in die Generalterminplanung ist dieses ebenso bei der Erstellung des Baustellenordnungsplans zu berücksichtigen. Darüber hinaus ist eine separate, den Grundsätzen des Baustellenordnungsplans folgende, Visualisierung der physischen Infrastruktur des Baustellenversorgungssystems zu erstellen. Abgeschlossen wird der Prozess der Entwurfsplanung mit einer Ermittlung der Baulogistikkosten. Hierbei sind zusätzlich zu den üblichen Baulogistikkosten, wie bereits in Kapitel 3.2.2 thematisiert, die Kosten für die Planung und die Errichtung sowie die Kosten für den Betrieb des Baustellenversorgungssystems zu ermitteln. Diesen zusätzlichen Kosten sollten die möglichen Kostenreduzierungen auf Grund der Risikominimierung im Kontext der Baustellenversorgung sowie die möglichen Kostenreduzierungen bei anderen Kostenbestandteilen des Projekts, die aus der Nutzung des Baustellenversorgungssystems resultieren, gegenübergestellt werden.

In der Leistungsphase 4 „Genehmigungsplanung“ wird die behördliche Erteilung der Baugenehmigung erwirkt. In diesem Zusammenhang kann das Baulogistikkonzept Bestandteil respektive Voraussetzung für die Genehmigungsfähigkeit des Bauprojekts werden. Das Baustellenversorgungssystem, als wesentlicher Teil des Baulogistikkonzepts, kann dabei positive Auswirkungen auf den Genehmigungsprozess und die damit verbundene Genehmigungsfähigkeit des Bauprojekts haben. Die Notwendigkeit einer Genehmigung für das Baustellenversorgungssystem ist mit den zuständigen Behörden abzustimmen. Hierbei sind u. a. die Ausprägung und der Standort sowie die vorgesehene Nutzungsdauer des Baustellenversorgungssystems relevante Faktoren.

Die vorgestellte und durch das Baulogistikkonzept dokumentierte Planung des Baustellenversorgungssystems gewährleistet zum einen eine eindeutige und erschöpfende Ausschreibung der mit dem Baustellenversorgungssystem in Verbindung stehenden Leistungen und bildet zum anderen die Basis für das baulogistische Ausführungsregelwerk in Form des Baulogistikhandbuchs. Das Baulogistikkonzept dient somit als Grundlage und Übergabeparame-

ter für die im folgenden Kapitel erläuterte Baulogistikorganisation. Die nachfolgende Abbildung zeigt zusammenfassend die wesentlichen Aspekte und Prozesse hinsichtlich der Planung des Baustellenversorgungssystems.



Abbildung 81: Baustellenversorgungssystem – Planung⁷³⁴

In Analogie zur Nachhaltigkeitsanalyse und Bewertung der Baulogistikattribute sowie der Beurteilung des Baustellenversorgungssystems im Rahmen der Baulogistikinitiierungsphase sollten auch im Zuge der Baulogistikplanungsphase Aspekte der Nachhaltigkeit intensiv betrachtet werden. Die Ressourcen- und Prozessplanung des Baustellenversorgungssystems sowie die Beurteilung der verschiedenen baulogistischen Lösungsvarianten sollten sich an den Regelungen zur Nachhaltigkeitsberichterstattung sowie den Kriterienkatalogen und Bewertungsrichtlinien der Zertifizierungssysteme orientieren. Darüber hinaus sind bereits in der frühen Baulogistikplanungsphase alle Projektbeteiligten hinsichtlich ihrer baulogistischen Schnittstellen, die sich aus der Nachhaltigkeitsberichterstattung oder den Zertifizierungssystemen ergeben, zu sensibilisieren. Hierbei können für die verschiedenen Projektbeteiligten unterschiedliche Pflichten und somit Interessen und baulogistische Schnittstellen resultieren.

⁷³⁴ Eigene Darstellung

5.3 Baustellenversorgungssystem – Organisation

Der Prozess der Baulogistikorganisation überführt das Baulogistikkonzept in die Ausführungsphase und dokumentiert durch die Erstellung des Baulogistikhandbuchs die projektspezifischen baulogistischen Ausführungsregeln für alle Bauprojektbeteiligten. Das Baulogistikhandbuch wird Vertragsbestandteil und ist somit Grundlage für eine zielführende Realisierung des Baulogistikkonzepts in der Ausführungsphase. Darüber hinaus systematisiert das Baulogistikhandbuch die Zusammenarbeit hinsichtlich der baulogistischen Prozesse. Dies beinhaltet u. a. eine präzise Definition der baulogistischen Prozesse sowie eine Zuordnung zu den jeweiligen Prozessverantwortlichen. Des Weiteren stellt das Baulogistikhandbuch einen Teil der Leistungsbeschreibung für die zu beauftragenden Baulogistikleistungen dar. Es präzisiert dabei das Baulogistikkonzept und stellt der Bieterseite die relevanten Informationen für ihre Kalkulation, Preisbildung, Arbeitsvorbereitung und Disposition der benötigten Ressourcen zur Verfügung.⁷³⁵ Vor dem Hintergrund einer Anwendung des Baustellenversorgungssystems gilt es im Folgenden, das für dieses System spezifische Baulogistikhandbuch zu behandeln.

Bevor auf die Inhalte des Baulogistikhandbuchs für das Baustellenversorgungssystem eingegangen wird, sind die möglichen Betreiber des Baustellenversorgungssystems anzusprechen. Hierbei sind die aus der Unternehmenseinsatzform des Gesamtprojekts resultierenden Einflüsse zu berücksichtigen. Das Baustellenversorgungssystem kann grundsätzlich von der Auftraggeberschaft selbst oder durch einen Baulogistikdienstleister betrieben werden. In diesem Kontext werden als Baulogistikdienstleister alle Akteure subsummiert die als Betreiber denkbar sind und die entsprechenden Leistungen erbringen können. Zu diesen Akteuren zählen neben den reinen Baulogistikdienstleistungsunternehmen bspw. Bauunternehmen aber auch Baustoffhändler und -lieferanten. Darüber hinaus sind öffentlich-private Partnerschaften vorstellbar, bei denen die öffentliche Hand aus bspw. Umweltschutzgründen oder ordnungspolitischen Maßnahmen die Anwendung des Baustellenversorgungssystems frühzeitig initiiert und vorschreibt und als privater Partner einer der o. g. Akteure fungiert. Die weiteren in Kapitel 5.1 dargestellten Ansätze zur Integration des Baustellenversorgungssystems in das baulogistische Netzwerk, wie bspw. als Ergebnis des Genehmigungsprozesses, als Vorgabe der Bauherrschaft im fortgeschrittenen Planungsprozess oder durch eine intrinsische Motivation respektive durch den Innovationswillen seitens eines ausführenden Unternehmens werden bei der Darstellung des Baulogistikhandbuchs nicht weiter berücksichtigt. Dies ist, wie bereits im Kontext der in Kapitel 5.1 dargestellten Ansätze erläutert, damit zu begründen, dass diese Ansätze auf Grund des Zeitpunkts der Berücksichtigung im Planungsprozess suboptimal sind.

⁷³⁵ Vgl. Ruhl et al. (2018): Baulogistikplanung, S. 27 f.

In der Leistungsphase 5 „Ausführungsplanung“ wird das Baulogistikhandbuch entwickelt. Spätestens zu diesem Zeitpunkt ist die Unternehmenseinsatzform des Bauprojekts und somit die Bauprojektorganisation festzulegen. Diese Festlegung hat einen unmittelbaren Einfluss auf die Organisation des Baustellenversorgungssystems und dementsprechend auf die inhaltliche Gestaltung und Ausprägung des Baulogistikhandbuchs. Im System der Einzelvergabe sind die Baulogistikdienstleistungen als eigenständiges Gewerk zu definieren, auszuschreiben und zu vergeben. Hierbei ist zu empfehlen, die erforderlichen Leistungen des Baustellenversorgungssystems nicht von den grundständigen Baulogistikdienstleistungen zu trennen, sondern sie als ein gemeinsames baulogistisches Gewerk zu betrachten. Dies führt zu einer ganzheitlichen Betrachtung aller zu erbringenden baulogistischen Leistungen sowie zu einer Schnittstellenreduzierung. Die Ausschreibung und Vergabe des Gewerks Baulogistik erfolgt unter Mitwirkung der Baulogistikfachplanung durch die Bauherrschaft. Im System der Unternehmenseinsatzformen Totalübernehmer und Totalunternehmer sowie Generalübernehmer und Generalunternehmer sollte die Ausschreibung und Vergabe der baulogistischen Leistungen gemeinsam mit den weiteren Ausführungsleistungen erfolgen. Wie bereits in der Einführung dieses Hauptkapitels geschildert, ist bei diesen Unternehmenseinsatzformen eine ganzheitliche Baulogistikorganisation in den Unternehmens- und Projektzielen während der gesamten Projektlaufzeit zu erwarten. Dies impliziert, dass diese Unternehmenseinsatzformen ein vorhandenes Baulogistikkonzept oder Baulogistikhandbuch innerhalb ihrer Organisation selbstständig in die Ausführungsphase überführen, fortschreiben und anpassen und somit ein auf ihre individuellen Produktionsprozesse abgestimmtes Baulogistikhandbuch formulieren. Es ist projektindividuell zu entscheiden, ob auch im Falle der Vergabe an einen Kumulativleistungsträger zusätzlich zum Baulogistikkonzept auch ein Baulogistikhandbuch erstellt und Bestandteil der Vergabeunterlagen wird. Grundsätzlich sollten u. a. zur Förderung des unternehmerischen Handelns den Kumulativleistungsträgern durch das Baulogistikkonzept respektive Baulogistikhandbuch mehr Freiheiten gegeben werden als im System der Einzelvergabe, welches ein Baulogistikhandbuch mit strikten Vorgaben ohne Interpretationsspielraum für alle Bauprojektbeteiligten erfordert. Die Leistungen des Gewerks Baulogistik können entweder durch den von der Bauherrschaft beauftragten Kumulativleistungsträger selbst erbracht oder durch diesen als Fremdleistung weitervergeben werden.

Auf Grund der in Abbildung 80 dargestellten unterschiedlichen Standortmöglichkeiten des Baustellenversorgungssystems, der verschiedenen Bauprojektorganisationen sowie den o. g. möglichen Akteuren, die als Baulogistikdienstleister in der Ausführungsphase agieren und die baulogistischen Leistungen erbringen können, ergeben sich in der realen operativen Prozessgestaltung im Rahmen des Baustellenversorgungssystems vielfältige Möglichkeiten. Das Baulogistikhandbuch sollte daher nicht zum Ziel haben, diese mannigfaltige Prozessgestaltung vorwegzunehmen und detailliert vorzugeben und somit die Bieterseite möglicherweise einzuschränken. Vielmehr sind die für die Bieterseite relevanten Randbedingungen hinsicht-

lich der Kalkulation, der Preisbildung, der Arbeitsvorbereitung und der Disposition der benötigten Ressourcen des Baustellenversorgungssystems zu beschreiben. Hierzu werden nachfolgend die wichtigsten Aspekte, die bei der Erstellung des Baulogistikhandbuchs für das Baustellenversorgungssystem zu beachten sind, thematisiert und allgemein beschrieben. Auf eine in der Praxis erforderliche Differenzierung nach Bauphasen und eine entsprechende bauphasenabhängige Ausarbeitung des Baulogistikhandbuchs wird dabei verzichtet. Die bauphasenabhängige Anwendung des Baustellenversorgungssystems kann u. a. aus der in Kapitel 5.2 dargestellten Materialeignungsanalyse abgeleitet werden. Darüber hinaus werden nur Aspekte angesprochen, die entweder explizit das Baustellenversorgungssystem betreffen oder relevante Schnittstellen zur grundständigen Baulogistikausführung und dessen Baulogistikhandbuch aufweisen. Um die o. g. ganzheitliche Betrachtung aller zu erbringenden baulogistischen Leistungen zu gewährleisten und die Ausschreibung und Vergabe eines gemeinsamen Gewerks Baulogistik zu ermöglichen, ist in der Praxis das zusätzlich zu erstellende Baulogistikhandbuch des Baustellenversorgungssystems in das der grundständigen Baulogistikausführung zu integrieren. Für die relevanten Inhalte sowie mögliche Strukturelemente des Baulogistikhandbuchs der grundständigen Baulogistikausführung wird auf RUHL et al.⁷³⁶ verwiesen.

Für das Baustellenversorgungssystem sind im Baulogistikhandbuch die im Folgenden beispielhaft aufgelisteten Aspekte zu bearbeiten. Diese Aspekte können als Ergebnis der Vertragsverhandlungen stellenweise Präzisierungen erfahren. Das Baulogistikhandbuch ist in diesen Fällen entsprechend fortzuschreiben.

Betreiber des Baustellenversorgungssystems:

- Angaben zum Betreiber des Baustellenversorgungssystems und dessen Ansprechpersonen sowie zur Relation zwischen dem Betreiber und den weiteren Bauprojektbeteiligten verbunden mit der Einordnung in die Bauprojektorganisation.

Standort und Verkehrsanbindung des Baustellenversorgungssystems:

- Angaben zum Standort, zu den Zugangsregelungen und zu den Betriebszeiten des Baustellenversorgungssystems sowie zu den Ein- und Ausfahrten zur Baustelle und zur physischen Infrastruktur des Baustellenversorgungssystems.
- Angaben zu den festgelegten Anfahrtswegen zur physischen Infrastruktur des Baustellenversorgungssystems unter Berücksichtigung und Einbindung der Lieferanten und Produzenten sowie zum geplanten Routenverkehr zwischen der physischen Infrastruktur des Baustellenversorgungssystems und der Baustelle.

⁷³⁶ Vgl. Ruhl et al. (2018): Baulogistikplanung, S. 28 ff.

Kapazitative und technische Anforderungen des Baustellenversorgungssystems:

- Angaben zu den benötigten und zur Verfügung zu stellenden Ressourcen und Einrichtungs-elementen auf Basis des Einrichtungs- und Ordnungsplans der physischen Infrastruktur des Baustellenversorgungssystems sowie in Abhängigkeit zu den nachfolgenden Prozessdefinitionen verbunden mit einer gewerkeweisen Limitierung der Bestandsreichweiten respektive der Materialmengen und der verfügbaren Lagerflächen.
- Angaben zu innerhalb des Baustellenversorgungssystems ggf. benötigten Transport-, Förder-, Kommissionier-, Lager- oder Verpackungssystemen und deren Auswirkung bspw. auf die Lagerdimensionierung und das Lagerlayout.
- Angaben zur Notwendigkeit und zur Anwendung von branchenspezifischen Lagerverwaltungs- respektive Warenwirtschafts- und Informationssystemen für eine eindeutige Inventarisierung und Kennzeichnung der Materialien inklusive aller relevanten Informationen für den Baustellenversorgungsprozess verbunden mit der in Kapitel 4.2 dargestellten Identifikation und Lokalisierung der Materialien sowie Überwachung und Digitalisierung des Materialflusses.

Aufgaben, Funktionen und Prozesse des Baustellenversorgungssystems:

- Definition der Prozesse Warenannahme, Wareneingang, Inventarisierung, Lagerung, Kommissionierung, Konsolidierung, Auftragszusammenfassung, Verpackung sowie Warenausgang und Auslieferung verbunden mit der Zuordnung zu einem Prozessverantwortlichen.
- Definition des Abruf- und Anlieferungsprozesses verbunden mit der Vorgabe einer produktionssynchronen Materialdisposition auf Basis der Methoden der Lean Construction.
- Angaben zur Priorisierung von Anlieferungen respektive zur Anlieferungsreihenfolge und -strategie unter Berücksichtigung des kritischen Wegs sowie der technologischen Abhängigkeiten im Bauzeitenplan bei bspw. Konflikten oder Kollisionen auf Grund der Notwendigkeit einer gleichzeitigen Durchführung mehrerer Anlieferungen für unterschiedliche Gewerke.
- Angaben zu den Abruf- und Bestellfristen sowie zum entsprechenden zeitlichen Vorlauf verbunden mit der Festlegung der Entscheidungsträger und Definition der Schnittstellen zwischen Besteller, Lieferant, Produzent, Betreiber und ausführendem Gewerk.
- Angaben zur Informationsdistribution und zur Anwendung polysensoraler Systeme zur Materialflusssteuerung im Sinne des in Kapitel 4.2 entwickelten Systems sowie zu dem im Kontext dieser Entwicklung diskutierten modellbasierten Abrufprozesses.

- Angaben zur Integration der Lieferanten und Produzenten innerhalb des Baustellenversorgungssystems sowie spezifische Angaben für diese Projektbeteiligten wie bspw. die Vorgabe zur Verwendung von standardisierten Förderhilfsmitteln.
- Angaben zur Abgrenzung des Baustellenversorgungssystems hinsichtlich der Aspekte Beschaffungs-, Zulauf-, Bestands- und Funktionsbündelung verbunden mit der Akzentuierung, dass das Baustellenversorgungssystem die Bündelung der Versorgungsströme fokussiert und die Schwerpunkte in der logistischen Konsolidierung und der projektspezifischen Kommissionierung der Materialien liegen.

Nutzung des Baustellenversorgungssystems:

- Angaben zur grundsätzlichen sowie bauphasen- und materialabhängigen Nutzung des Baustellenversorgungssystems durch die ausführenden Gewerke sowie damit verbunden die Festlegung von vertraglichen Regelungen mit dem Betreiber und den ausführenden Gewerken hinsichtlich des Umfangs und der Art der Nutzung des Baustellenversorgungssystems.
- Angaben zur gewerkeweisen Limitierung der Bestandsreichweiten respektive der Materialmengen und der verfügbaren Lagerflächen unter Berücksichtigung der in Kapitel 5.2 vorgestellten materialspezifischen Eignungsanalyse.

Verantwortungsbereiche der Projektbeteiligten:

- Angaben zu den Zuständigkeiten sowie zur Haftung und Gewährleistung innerhalb des Materialflusses und den zu definierenden Materialübergabepunkten und damit verbunden Angaben zu den durchzuführenden Qualitäts- und Quantitätskontrollen sowie zur Abgrenzung der Verantwortungsbereiche zwischen Betreiber, Lieferanten, Produzenten und ausführenden Gewerken hinsichtlich Beschädigungen, Verlusten und Mängeln bei der Lagerung, der Handhabung und dem Transport von Materialien.

Sanktionskatalog:

- Definition von Maßnahmen und Festlegung von Bußgeldern bei Verstößen gegen das Baulogistikhandbuch des Baustellenversorgungssystems.

Neben der Erstellung des Baulogistikhandbuchs sowie der Festlegung zur Unternehmenseinsatzform des Bauprojekts und somit der Bauprojektorganisation sind in der Leistungsphase 5 „Ausführungsplanung“ mögliche Vorabmaßnahmen zur Verbesserung der Produktionsrandbedingungen zu prüfen und durchzuführen. Im Kontext des Baustellenversorgungssystems kann dies u. a. die Herrichtung von Flächen und Zuwegungen bedeuten oder die Vorbereitung sowie Integration zur Nutzung von Informationssystemen im Sinne von polysensoralen Systemen zur Materialflusssteuerung beinhalten.

In der Leistungsphase 6 „Vorbereitung der Vergabe“ erfolgt im Wesentlichen die Zusammenstellung der Vergabeunterlagen. In der darauffolgenden Leistungsphase 7 „Mitwirkung bei der Vergabe“ werden die Angebote zur ausgeschriebenen bauleistungsbezogenen Leistung eingeholt, geprüft und bewertet sowie Bietergespräche geführt. Das Vergabeverfahren wird dokumentiert und mit der Vergabe der bauleistungsbezogenen Leistung an einen Bieter abgeschlossen. Im Zuge der Bietergespräche und der Vertragsverhandlungen werden die o. g. Aspekte Betreiber des Baustellenversorgungssystems sowie Verantwortungsbereiche der Projektbeteiligten präzisiert, vertraglich geregelt und durch eine Fortschreibung des Bauleistungs-Handbuchs für alle Bauprojektbeteiligten dokumentiert. Es können sich zwar darüber hinaus auch bei anderen Aspekten Präzisierungen und Fortschreibungen ergeben, die Definition des konkreten Betreibers setzt jedoch eine Auftragserteilung voraus und die Festlegung der Verantwortungsbereiche der Projektbeteiligten erfordert für eine finale Entscheidung zwingend eine Kommunikation und Abstimmung mit der Bieterseite. Die Zuordnung der Verantwortungsbereiche ist dabei u. a. von der Bereitschaft der einzelnen Projektbeteiligten abhängig, Verantwortungsbereiche zu übernehmen. Des Weiteren sind in diesem Kontext die Unternehmenseinsatzform, der Betreiber des Baustellenversorgungssystems, die Aufgaben, Funktionen und Prozesse des Baustellenversorgungssystems, die Materialeigenschaften, die durchführende Instanz des Materialtransports zwischen Baustellenversorgungssystem und Baustelle sowie eine mögliche getrennte Vergabe des Materials und der Lohnleistung bei den ausführenden Gewerken relevante Kriterien für eine zielführende Zuordnung der Verantwortungsbereiche. Es sollte angestrebt werden, dass der Betreiber am Wareneingang des Baustellenversorgungssystems die Verantwortung für die Materialien vom Lieferanten übernimmt und diese bis zur Übergabe an die ausführenden Gewerke auf der Baustelle trägt. Bei jedem Übergang der Verantwortungsbereiche sind entsprechende Qualitäts- und Quantitätskontrollen durchzuführen und zu dokumentieren. Dieses Vorgehen erfordert zwar eine gewisse Risikobereitschaft seitens des Betreibers und damit verbunden eine kalkulatorische Berücksichtigung dieser Randbedingung, führt jedoch bei einer ganzheitlichen Betrachtung zum effizientesten Prozessablauf. Hierbei kann eine Risikoreduzierung dadurch erzielt werden, dass die ausführenden Gewerke bei der Wareneingangskontrolle ihrer bestellten Materialien anwesend sind und gemeinsam mit dem Betreiber die Qualitäts- und Quantitätskontrolle durchführen und dokumentieren. Dies setzt jedoch seitens der ausführenden Gewerke die Bereitschaft voraus, für diesen Prozess Personal bereitzustellen. Die nachfolgende Abbildung zeigt zusammenfassend die wesentlichen Aspekte und Prozesse hinsichtlich der Organisation des Baustellenversorgungssystems.



Abbildung 82: Baustellenversorgungssystem – Organisation⁷³⁷

An dieser Stelle erfolgt vor dem Hintergrund der vorliegenden Arbeit ein kurzer Exkurs zur getrennten Vergabe des Materials und der Lohnleistung bei ausführenden Gewerken. In diesen Fällen kann das Material durch einen Kumulativleistungsträger oder die Bauherrschaft aber auch bspw. durch den Betreiber des Baustellenversorgungssystems beschafft und bereitgestellt werden. Die Materialbeschaffung sowie die zeitliche und räumliche Materialflusssteuerung können somit durch dieselbe Instanz erfolgen. Dies kann zum einen auf Grund einer zentralisierten Materialbeschaffung sowie einer gewissen Marktstellung des Bestellers zu ökonomischen Vorteilen führen sowie zum anderen die o. g. Zuordnung der Verantwortungsbereiche vereinfachen und eine übergeordnete Betrachtung der baulogistischen Prozesse unterstützen. Demgegenüber stehen jedoch die sich bei der Materialgestellung ergebende Risiken, wie bspw. komplizierte Haftungs- und Gewährleistungskonstellationen zwischen dem Erbringer der Lohnleistung (Ausführungsmangel) und dem Besteller der Materialien (Materialmangel) im Falle einer mangelhaften Leistung. Daher wird eine Materialgestellung bei Gewerken des Ausbaus trotz der zu würdigenden sowie realisierbaren wirtschaftlichen und baulogistischen Vorteile nach Expertenmeinung⁷³⁸ hinsichtlich des Gesamtablaufs im Regelfall als kritisch betrachtet.

Die Relevanz des Baulogistikhandbuchs ist auch vor dem Hintergrund der Nachhaltigkeit herauszustellen. Innerhalb des Baulogistikhandbuchs sollten die Regelungen und Verpflichtungen im Bezug zur Nachhaltigkeit deutlich herausgearbeitet und exponiert dargestellt werden. Hierzu können bspw. Angaben zur ressourcenschonenden Auswahl der Einrichtungselemente des Baustellenversorgungssystems oder zur Verwendung von emissionsarmen Lieferfahrzeugen zählen. Darüber hinaus sind aus Sicht der Nachhaltigkeit die im Baulogistikhandbuch formulierte Integration der Lieferanten und Produzenten in das Baustellenversorgungssystem und damit verbunden die Nutzung des entwickelten polysensoralen Systems zur Daten- und Informationsversorgung zu forcieren. Dies ist damit zu begründen, dass auf Grund der Verpflichtung zur Nachhaltigkeitsberichterstattung und zur Nachweiserfüllung der Kriterienkataloge und Bewertungsrichtlinien der Zertifizierungssysteme, Instrumente und Prozesse zu implementieren sind, die die vollständige Generierung der erforderlichen Daten und Informationen sicherstellen. Hierfür bietet das polysensorale System einen Mehrwert. An dieser Stelle ist anzumerken, dass im Kontext der Nachhaltigkeitsberichterstattung und der Zertifizierungssysteme Informationen und Daten auf allen Ebenen und entlang des gesamten

⁷³⁷ Eigene Darstellung

⁷³⁸ Vgl. Gröble (2020): Eine Untersuchung zum Vergabeprozess des Generalunternehmers bei Gewerken des Ausbaus

Prozesses erforderlich und demnach zu erfassen sind. Dies betrifft bspw. die Daten- und Informationserfassung bei Materiallieferketten oder bei Nachunternehmervergaben, da die Verantwortlichen des nachfolgenden Prozesses respektive die darüber liegenden operativen Ebenen berichtspflichtig im Sinne der Nachhaltigkeitsberichterstattung sind oder die Zertifizierung des Bauwerks oder der Baustelle anstreben. Neben den bereits genannten Nachhaltigkeitsaspekten innerhalb der Phase der Baulogistikorganisation wird empfohlen, bei der Angebotsprüfung das Wertungskriterium Nachhaltigkeit einzuführen und die Erfüllung der Nachhaltigkeitsanforderungen bei den Angeboten entsprechend zu prüfen und zu bewerten.

5.4 Baustellenversorgungssystem – Realisierung

Durch den Prozess der Baulogistikrealisierung wird der Baulogistikprozess abgeschlossen. In der Realisierungsphase wird das Baulogistikhandbuch umgesetzt und somit der vorgelagerte baulogistische Planungsprozess in die reale baulogistische Ausführungsleistung überführt. Damit verbunden ist eine Umsetzungskontrolle in Form eines adäquaten Baulogistikcontrollings. Das Baulogistikcontrolling beinhaltet dabei die Dokumentation, Steuerung, Regelung, Kontrolle sowie Überwachung und Abrechnung der baulogistischen Ausführungsleistungen auf Basis des Baulogistikhandbuchs. Für das Baustellenversorgungssystem bedeutet dies, die Umsetzung des im vorherigen Kapitel dargestellten Baulogistikhandbuchs durch den Betreiber des Baustellenversorgungssystems sowie den weiteren Bauprojektbeteiligten. Als Unterstützung des Baulogistikcontrollings ist das entwickelte polysensorale System zu empfehlen. Die nachfolgende Abbildung zeigt zusammenfassend die wesentlichen Aspekte und Prozesse hinsichtlich der Realisierung des Baustellenversorgungssystems.

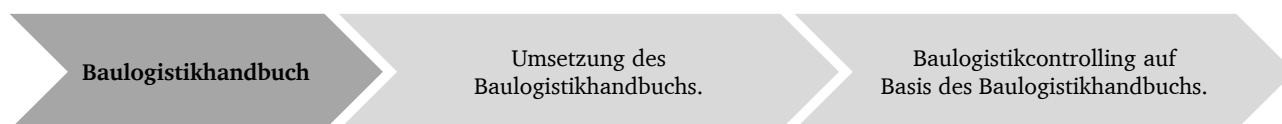


Abbildung 83: Baustellenversorgungssystem – Realisierung⁷³⁹

Durch die Anwendung des Baustellenversorgungssystems und damit verbunden die Umsetzung des Baulogistikhandbuchs werden auch die berücksichtigten und geplanten Aspekte der Nachhaltigkeit realisiert. Die Realisierung dieser Aspekte unterstützt die Erfüllung der verschiedenen Anforderungen hinsichtlich der Nachhaltigkeitsberichterstattung und der Zertifizierungssysteme. Der Leitfaden Nachhaltiges Bauen⁷⁴⁰ fordert an mehreren Stellen bspw. eine lärm- und staubarme Baustelle, eine Minimierung des Energie- und Ressourcenverbrauchs sowie die Reduzierung von Transportaufwendungen und die grundsätzliche Ressourcen- und Umweltschonung. Innerhalb des Rahmenwerks für klimaneutrale Gebäude und Standorte⁷⁴¹ werden an mehreren Stellen bspw. eine notwendige Erfassung der Treibhausgasemissionen von Bauprodukten sowie deren Transportwege formuliert. Durch das Zertifizierungssystem für nachhaltige Baustellen wird das Rahmenwerk erweitert und ergänzt sowie im Bezug zum Bilanzrahmen hinsichtlich der Treibhausgasemission der Transporte von Baustoffen und Bauprodukten zur Baustelle präzisiert. Darüber hinaus werden in den Kriterienkatalogen für eine nachhaltige Baustelle^{742, 743, 744} neben der grundsätzlichen Vermeidung

⁷³⁹ Eigene Darstellung

⁷⁴⁰ Vgl. Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (2019): Leitfaden Nachhaltiges Bauen

⁷⁴¹ Vgl. Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V. (2020b): Rahmenwerk für klimaneutrale Gebäude und Standorte

⁷⁴² Vgl. DGNB GmbH (o. J.): DGNB System – Kriterienkatalog Nachhaltige Baustelle – Systemgrundlagen Nachhaltige Baustelle

⁷⁴³ Vgl. DGNB GmbH (o. J.): DGNB System – Kriterienkatalog Nachhaltige Baustelle – 1-BS Baustellenorganisation

⁷⁴⁴ Vgl. DGNB GmbH (o. J.): DGNB System – Kriterienkatalog Nachhaltige Baustelle – 2-BS Ressourcenschutz

von Belastungen auf Baustellen und im Baustellenumfeld u. a. die Aspekte Ressourcenschonung, Schadstoffvermeidung sowie Emissionsminimierung aufgeführt. Des Weiteren werden umwelt- und anwohnerorientierte Logistikkonzepte sowie eine Reduzierung des Verkehrsaufkommens gefordert und Anforderungen an umweltgerechte Transportmittel formuliert. Im Kontext des Transportverkehrs ist durch die Erfassung der Transportstrecken, der CO₂-Emissionen, der Transportmittel und -güter eine Datentransparenz zu gewährleisten. Die exemplarisch genannten Anforderungen der Zertifizierungssysteme werden durch das Baustellenversorgungssystem positiv beeinflusst. Diese positiven Auswirkungen sind in Kapitel 3.2.2 herausgearbeitet und umfassen u. a. die Reduzierung des Verkehrsaufkommens und des Emissionsausstoßes, die Erhöhung der Transportfahrzeugauslastung sowie den Einsatz von emissionsärmeren Transportfahrzeugen oder die Reduzierung von Warte- und Entladezeiten der Transportfahrzeuge.

Neben den positiven Auswirkungen auf die originären bauleistungsorientierten Ausführungsprozesse sowie auf die Zertifizierungssysteme bietet das Baustellenversorgungssystem auch hinsichtlich der Nachhaltigkeitsberichterstattung einen Mehrwert. Durch die Digitalisierung des Materialflusses innerhalb des Baustellenversorgungssystems kann die Informationslücke bezüglich der relevanten Daten und Informationen für die Nachhaltigkeitsberichterstattung geschlossen werden. Das entwickelte polysensorale System ermöglicht neben der Prozessidentifikation auch eine Emissionsdetektion und stellt somit ein zentrales Informationsversorgungssystem u. a. für die Transportprozesse oder die Materialstandorte und -bestände dar. Diese Daten und Informationen können als Input für die Nachhaltigkeitsberichterstattung und der damit verbundenen Treibhausgasbilanzierung genutzt werden. An dieser Stelle sei der Vollständigkeit halber auf die aktuell zur Nachhaltigkeitsberichterstattung im Auftrag der EU-Kommission durch die European Financial Reporting Advisory Group in Bearbeitung befindlichen einheitlichen EU-Berichtsstandards⁷⁴⁵ sowie zur Treibhausgasbilanzierung auf das Greenhouse Gas Protocol⁷⁴⁶ zur standardisierten Erfassung verwiesen. Zusätzlich zur Nutzung, der durch das polysensorale System erfassten Daten und Informationen bei der Nachhaltigkeitsberichterstattung bieten diese Daten und Informationen bspw. im Zuge der genannten Datentransparenz im Kontext des Transportverkehrs auch einen Mehrwert für die Zertifizierungssysteme. Die Datenaufbereitung und die Informationsdarstellung innerhalb des entwickelten polysensoralen Systems sollten sich u. a. auch an den zuvor genannten Standards sowie an den aus den Zertifizierungssystemen resultierenden Anforderungen orientieren.

⁷⁴⁵ Vgl. www.deutscher-nachhaltigkeitskodex.de/de-DE/Home/Berichtspflichten/CSRD

⁷⁴⁶ Vgl. World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development (2004): The Greenhouse Gas Protocol – A Corporate Accounting and Reporting Standard

In Abbildung 84 ist die in den vorherigen Unterkapiteln dargestellte Systemintegration des Baustellenversorgungssystems in das Baulogistikprozessmodell gezeigt. Die Abbildung konzentriert sich hierbei aus Darstellungsgründen auf die sich ergebenden Präzisierungen, Ergänzungen und Erweiterungen des Baulogistikprozessmodells.

Leistung	Bauherr		Planer		Auftragnehmer	
	Auftraggeber / Projektsteuerer		Objektplaner / Baulogistikplaner		Unternehmer / Baulogistiker	
Bedarfsplanung	Analyse zur Anwendung des Baustellenversorgungssystems					
Grundlagenermittlung (LPH 1)	Entscheidung zur Beauftragung einer baulogistischen Planung des Baustellenversorgungssystems		Baulogistikbericht			
			Dokumentation zur Initiierung des Baustellenversorgungssystems und deren Konsequenzen			
Vorplanung (LPH 2)	Festlegung der baulogistischen Vorzugsvariante gemeinsam mit dem Baulogistikplaner		Analyse der zusätzlich erforderlichen Baulogistikleistungen und den zu beteiligenden Akteuren			
			Variantenplanung mit Baustellenversorgungssystem, Material-eignungsanalysen, Beurteilung der verschiedenen Varianten			
Entwurfsplanung (LPH 3)	Abstimmung und Festlegung zu den Aufgaben und Funktionen des Baustellenversorgungssystems gemeinsam mit dem Baulogistikplaner		Visualisierung und Ressourcenplanung des Baustellenversorgungssystems, Berücksichtigung des Baustellenversorgungssystems bei der Termin- und Kostenplanung			
			Baulogistikkonzept			
Genehmigungsplanung (LPH 4)	Erwirken einer möglichen Genehmigung für das Baustellenversorgungssystem		Klärung der Notwendigkeit einer Genehmigung für das Baustellenversorgungssystem, Mitwirkung beim Genehmigungsprozess im Falle der Notwendigkeit einer Genehmigung			
Ausführungsplanung (LPH 5)	Aktualisierungen der Einflussgrößen		Entwicklung und Erstellung des Baulogistikhandbuchs für das Baustellenversorgungssystem			
			Baulogistikhandbuch			
Vorbereitung der Vergabe (LPH 6)	Prüfung der Einflussgrößen		Zusammenstellung der Vergabeunterlagen für das Baustellenversorgungssystem			
Mitwirken bei der Vergabe (LPH 7)	Vertragsverhandlungen, Auftragserteilung und Festlegung Betreiber, Zuordnung der Verantwortungsbereiche innerhalb des Baustellenversorgungssystems gemeinsam mit dem Baulogistikplaner		Prüfung und Wertung der Angebote, Mitwirkung bei den Verhandlungen und der Vertragsgestaltung		Kalkulation, Arbeitsvorbereitung	
			Aktualisierung und Fortschreibung des Baulogistikhandbuchs gemäß den Vertragsverhandlungen			
Objektüberwachung (LPH 8)			Überwachung, Abrechnung		Betrieb des Baustellenversorgungssystems	
Dokumentation (LPH 9)			Bericht			

Abbildung 84: Baulogistikprozessmodell – Baustellenversorgungssystem⁷⁴⁷

⁷⁴⁷ In Anlehnung an Ruhl et al. (2018): Baulogistikplanung, S. 11 und Ruhl (2016): Entwicklung eines Baulogistikprozessmodells, S. 100 weiterentwickelt

Es ergeben sich bei der Integration des Baustellenversorgungssystems in das Baulogistikprozessmodell im Wesentlichen die folgenden Erweiterungen und Ergänzungen im Baulogistikprozessmodell und damit verbunden ein erweitertes Leistungsbild im Vergleich zu dem von RUHL et al.⁷⁴⁸ empfohlenen Leistungsbild der Baulogistikplanung. Die Relevanz hinsichtlich einer intensiven Berücksichtigung und Betrachtung der geschilderten Aspekte der Nachhaltigkeit im Baulogistikprozessmodell wird an dieser Stelle nochmals hervorgehoben und führt innerhalb aller Leistungsphasen zu einem erweiterten Leistungsbild.

Bedarfsplanung:

- Analyse und Bewertung der baulogistischen Anfangsparameter und Einflussgrößen hinsichtlich einer projektspezifischen Eignung und Anwendung des Baustellenversorgungssystems.
- Erstellung des Baulogistikberichts und im Zuge dessen Dokumentation der begründeten Entscheidung hinsichtlich der Initiierung des Baustellenversorgungssystems sowie Angaben zum spezifischen Leistungsumfang und zu den einzubindenden Beteiligten bei der Anwendung des Baustellenversorgungssystems.

Grundlagenermittlung:

- Analyse und Bewertung der sich bei der Anwendung des Baustellenversorgungssystems ergebenden zusätzlichen Baulogistikleistungen sowie zusätzlich zu beteiligenden Personen und Organisationen auf Basis des Baulogistikberichts. Berücksichtigung dieser Leistungen, Personen und Organisationen im Abwicklungskonzept und im projektbezogenen Rahmenterminplan.

Vorplanung:

- Entwicklung baulogistischer Lösungsvarianten, die eine Integration des Baustellenversorgungssystems beinhalten und im Zuge dessen Ermittlung der erforderlichen Flächenbedarfe und Klärung hinsichtlich der entsprechenden Flächenverfügbarkeit sowie Suche und Auswahl der entsprechenden Flächen.
- Durchführung von materialspezifischen Eignungsanalysen vor dem Hintergrund einer Anwendung des Baustellenversorgungssystems als Grundlage für die durchzuführenden Materialflussprognosen und -analysen der verschiedenen baulogistischen Lösungsvarianten.
- Beurteilung der verschiedenen baulogistischen Lösungsvarianten und methodisch begründete Auswahl und im Zuge dessen Festlegung der baulogistischen Vorzugsvariante seitens der Auftraggeberschaft gemeinsam mit der Baulogistikfachplanung.

⁷⁴⁸ Vgl. Ruhl et al. (2018): Baulogistikplanung, S. 19 ff.

Entwurfsplanung:

- Ressourcenplanung der physischen Infrastruktur des Baustellenversorgungssystems auf Grundlage der Flussanalysen der bauleistungsorientierten Vorzugsvariante und im Zuge dessen projektindividuelle Abstimmung und Festlegung zwischen Auftraggeberschaft und Bauleistungsplanung, welche Aufgaben und Funktionen das Baustellenversorgungssystem übernehmen soll.
- Visualisierung des Baustellenversorgungssystems durch einen Einrichtungs- und Ordnungsplan der physischen Infrastruktur des Baustellenversorgungssystems.
- Darstellung und Berücksichtigung des Baustellenversorgungssystems bei der Erstellung des Generalterminplans sowie des Baustellenordnungsplans.
- Berücksichtigung des Baustellenversorgungssystems bei der Ermittlung der Bauleistungskosten.
- Dokumentation der durchgeführten Planungsprozesse sowie der erzielten Planungsergebnisse durch die Erstellung des Bauleistungskonzepts.

Genehmigungsplanung:

- Abstimmung mit den Behörden hinsichtlich der Notwendigkeit einer Genehmigung für das Baustellenversorgungssystem sowie Mitwirkung bei der Zusammenstellung der Genehmigungsunterlagen im Falle der Notwendigkeit einer behördlichen Genehmigung.

Ausführungsplanung:

- Entwicklung und Erstellung des Bauleistungshandbuchs für das Baustellenversorgungssystem.
- Prüfung und Durchführung möglicher Vorabmaßnahmen im Kontext des Baustellenversorgungssystems zur Verbesserung der Produktionsrandbedingungen.

Vorbereitung der Vergabe:

- Zusammenstellung der für das Baustellenversorgungssystem relevanten Vergabeunterlagen.

Mitwirkung bei der Vergabe:

- Prüfung und Bewertung der eingegangenen Angebote für die ausgeschriebenen Leistungen des Baustellenversorgungssystems.
- Durchführung von Bietergesprächen und Mitwirkung bei der Auftragserteilung sowie Vertragsgestaltung und im Zuge dessen Festlegung des Betreibers und Zuordnung der Verantwortungsbereiche innerhalb des Baustellenversorgungssystems.

- Aktualisierung und Fortschreibung des Baulogistikhandbuchs gemäß den Vertragsverhandlungen.

Objektüberwachung:

- Umsetzung des Baulogistikhandbuchs durch den Betreiber des Baustellenversorgungssystems und im Zuge dessen Umsetzungskontrolle in Form eines adäquaten Baulogistikcontrollings.

Das Baustellenversorgungssystem wird abschließend gemäß Abbildung 85 in das Prozesskonzept der Baulogistik integriert.

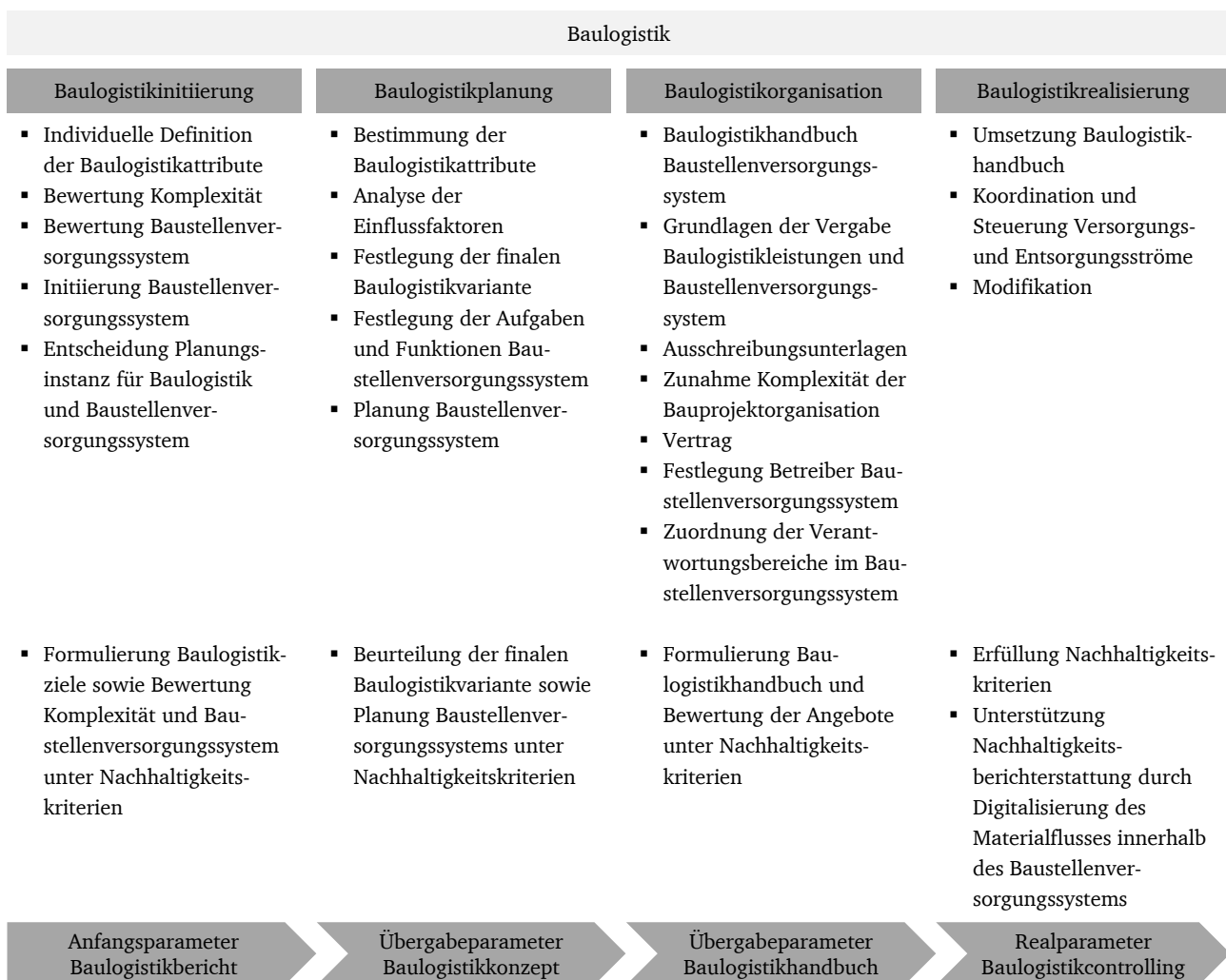


Abbildung 85: Prozesskonzept der Baulogistik – Baustellenversorgungssystem⁷⁴⁹

⁷⁴⁹ In Anlehnung an Ruhl et al. (2018): Baulogistikplanung, S. 10 weiterentwickelt

6 Schlussbetrachtung

Das nachfolgende Kapitel beinhaltet eine ergebnisorientierte Zusammenfassung der vorangegangenen Kapitel und ein Fazit zur vorliegenden Arbeit. Hierbei werden die formulierten Forschungsfragen beantwortet. Darüber hinaus wird ein Ausblick zu möglichen Entwicklungen sowie weiterem Forschungsbedarf gegeben.

6.1 Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Dissertation wird die gegenwärtige Versorgungssituation von Baustellen analysiert. Den identifizierten Schwachstellen wird mit der Entwicklung eines Baustellenversorgungssystems begegnet. Abschließend erfolgt die Systemintegration in das bestehende Baulogistikprozessmodell. Die Entwicklung und Integration des Baustellenversorgungssystems basiert dabei auf einer Kombination aus Literaturstudium, Baustellen- und Laborstudien sowie Experteninterviews.

In Kapitel 1 werden die Ausgangssituation und Problemstellung, die Ziele sowie die Forschungsmethodik und der Aufbau der Arbeit geschildert. Die Ausgangssituation und Problemstellung der Arbeit werden durch die Erörterungen zu den Potenzialen bei der Baulogistikorganisation und -koordination sowie den Schwachstellen bei der Baulogistikrealisierung dargestellt und es wird die Notwendigkeit zur Berücksichtigung der modernen Technologien sowie der Lean Logistics innerhalb der Arbeit begründet. Die Ziele der Arbeit werden aus der Ausgangssituation und Problemstellung abgeleitet und durch die Formulierung von Forschungsfragen konkretisiert. Es wird das Erfordernis zur Entwicklung eines innovativen Baustellenversorgungssystems sowie dessen Systemintegration in das bestehende Baulogistikprozessmodell dargelegt.

In Kapitel 2 werden die Grundlagen zur Logistik, zur Baulogistik sowie zur Lean Logistics und zur Digitalisierung erörtert. Die Ausführungen zu den Grundlagen der Logistik und Baulogistik dienen als Ausgangspunkt für die in Kapitel 3 beschriebenen Basiselemente der Systembildung sowie für die Systemintegration in Kapitel 5. In den Unterkapiteln zur Lean Logistics und zur Digitalisierung werden die bei der Entwicklung des Baustellenversorgungssystems jeweils zu berücksichtigenden Aspekte sowie die daraus resultierenden Möglichkeiten herausgearbeitet.

In Kapitel 3 werden die Basiselemente der Systembildung erläutert. Diese Basiselemente sind ein prozess- und flussorientierter Ansatz des unternehmensübergreifenden Supply-Chain-Managements, eine Umsetzung des Konzepts Warenverteilzentrum sowie der Einsatz eines polysensoralen Systems zur automatischen Bauprozessidentifikation nach dem ereignisbasierten Ansatz und damit verbunden eine Prozesssteuerung und -regelung in Echtzeit. Die Potenziale und positiven Auswirkungen eines Warenverteilzentrums in der Bauindustrie werden durch eine Analyse von publizierten Projektberichten herausgearbeitet und anhand der Auswertung von Experteninterviews verifiziert.

In Kapitel 4 werden die Systementwicklung und die Systemevaluation des Baustellenversorgungssystems beschrieben. Die durchgeführte Situationsanalyse zum gegenwärtigen Baustellenversorgungsprozess verdeutlicht die Notwendigkeit der Systementwicklung. Die Situationsanalyse, die entlang der Prozesskette Bestellung, Avisierung, Anlieferung und Lagerung erfolgt, zeigt u. a., dass der Bestellprozess als analog, wenig nachvollziehbar und transparent

sowie durch manuelle Tätigkeiten als fehleranfällig zu beschreiben ist. Außerdem ist bei der Nutzung von Avisierungssystemen festzustellen, dass diese seitens der Projektbeteiligten nicht konsequent beachtet werden und im Falle der Nutzung Abweichungen hinsichtlich der avisierten und den tatsächlichen Ankunfts- und Abfahrtszeiten der Transportfahrzeuge sowie deren Aufenthaltsdauer auf der Baustelle zu konstatieren sind. Des Weiteren kann belegt werden, dass JIT-Transporte aktuell die Ausnahme darstellen und Lagertransporte dominant sind. Aufbauend auf der Situationsanalyse sowie den theoretischen Grundlagen werden die Anforderungen an das Baustellenversorgungssystem analysiert. Es wird u. a. herausgearbeitet, dass ein zentral gesteuertes bauleistungslogistisches Gesamtsystem erforderlich ist, welches gewerke- und subsystemübergreifend zu gestalten ist und die vorgelagerten Produktions- und Logistikprozesse sowie die Bauproduktions- und Bauleistungslogistikprozesse unternehmensübergreifend berücksichtigt und synchronisiert. Dies erfordert einen durchgängigen, automatisierten, systematisierten und digitalisierten Informationsfluss und -austausch sowie eine verbesserte Kommunikation aller Prozessbeteiligten. Darüber hinaus werden Anforderungen bezüglich einer nachhaltigeren Bauleistungslogistik definiert. Die Anforderungsanalyse impliziert zum einen die Anwendung eines Warenverteilzentrums sowie zum anderen die Nutzung eines polysensoralen Systems zur automatischen Bauprozessidentifikation innerhalb des Baustellenversorgungssystems. Die Notwendigkeit der Integration eines polysensoralen Systems sowie eines Warenverteilzentrums wird anhand einer Systembeschreibung präzisiert. Auf Basis der erarbeiteten funktionalen und technischen Systemanforderungen werden der Systemaufbau und der Systemablauf des polysensoralen Systems entwickelt und dargestellt. Abschließend wird die prototypische Umsetzung und Evaluation des entwickelten Systems anhand von drei definierten Anwendungsfällen in Form von Labor- und Feldversuchen durchgeführt. Im Zuge der Systementwicklung und Systemevaluation werden gemäß dem ereignisbasierten Ansatz zunächst Prozessketten der sensorisch zu erfassenden Ereignisse entwickelt und entsprechende Prozessindikatoren definiert. Als Prozessindikatoren, die als Messgröße sensorisch erfasst werden, dienen die Position, das Gewicht, die Bewegung und die Neigung. Die sensorische Erfassung der Messgrößen respektive die Datenerfassung über Sensoren erfolgt über ein IoT-Funksystem, bestehend aus Datenerfassung, Datenübertragung, Datenstrukturierung sowie Datenaufbereitung und Datenauswertung. Im Rahmen der drei Anwendungsfälle „Intelligenter Materialfluss“, „Intelligente Palette“ und „Intelligentes Bauteil“ wird belegt, dass das entwickelte polysensorale System und die eingesetzten Sensoren eine automatisierte Prozessidentifikation und damit verbunden eine sensorische Erfassung der definierten Prozessketten und darauf basierender komplexer Ereignisse ermöglichen. Die Visualisierung der Daten kann über Dashboards entsprechend der erarbeiteten Mock-Ups erfolgen. Ferner können zur Informationsaufbereitung innerhalb von Bauwerksmodellen die exemplarisch entwickelten Plug-ins genutzt werden.

In Kapitel 5 wird das entwickelte Baustellenversorgungssystem in das bestehende Baulogistikprozessmodell integriert. Die Integration erfolgt nach den Phasen der Baulogistikinitiation, -planung, -organisation und -realisierung. Des Weiteren wird das Baustellenversorgungssystem in Bezug zur Nachhaltigkeit diskutiert. In der Baulogistikinitiationsphase erfolgt schwerpunktmäßig die Analyse der Baulogistikattribute vor dem Hintergrund einer Anwendung des Baustellenversorgungssystems und die sich daraus ergebende Präzisierung und Erweiterung der Baulogistikattribute. Zur Veranschaulichung der analysierten, diskutierten und dargestellten Baulogistikattribute werden plastische Projektbeispiele respektive Projektprofile erarbeitet. In der Baulogistikplanungsphase werden die zusätzlichen Planungsaufgaben, die sich bei der Umsetzung des Baustellenversorgungssystems ergeben, erörtert. Hierzu zählen bspw. die Entwicklung zusätzlicher baulogistischer Lösungsvarianten, die eine Integration des Baustellenversorgungssystems beinhalten, die Ressourcenplanung der physischen Infrastruktur des Baustellenversorgungssystems oder die materialspezifische Analyse, inwiefern ein bestimmtes Material für die Anlieferung über die physische Infrastruktur des Baustellenversorgungssystems geeignet oder nicht geeignet ist. Für diese Planungsaufgabe wird eine Entscheidungshilfe erarbeitet und vorgestellt. In der Baulogistikorganisationsphase wird das spezifische Baulogistikhandbuch für das Baustellenversorgungssystem hergeleitet und damit in Verbindung stehende Aspekte wie bspw. der Betreiber oder die Zuordnung von Verantwortungsbereichen beschrieben. In der Baulogistikrealisierungsphase erfolgt die Umsetzung des dargestellten Baulogistikhandbuchs durch den Betreiber des Baustellenversorgungssystems sowie den weiteren Bauprojektbeteiligten. In diesem Zuge kann auf Grund der beschriebenen Beachtung der Nachhaltigkeit in den vorgelagerten Planungsphasen und damit verbunden die Orientierung an den Regularien der Nachhaltigkeitsberichterstattung sowie den Kriterienkatalogen und Bewertungsrichtlinien der Zertifizierungssysteme die Baulogistik in der Realisierungsphase einen positiven Einfluss auf die Nachhaltigkeit ausüben.

6.2 Fazit

Das entwickelte Baustellenversorgungssystem ist das Ergebnis einer Zusammenführung verschiedener Elemente. Hauptelemente des Systems sind ein Warenverteilzentrum und das entwickelte polysensorale System. Daher wird zunächst jeweils ein Fazit zu diesen beiden Systemelementen gezogen und abschließend das Gesamtsystem betrachtet.

Durch die Umsetzung eines Warenverteilzentrums lassen sich positive Auswirkungen sowohl bei der Prozessausführung als auch bei der Prozesssteuerung und -regelung sowie der Organisation und Koordination beobachten und umsetzen. Des Weiteren wirkt sich das Warenverteilzentrum positiv auf die Nachhaltigkeit aus.

Die positiven Auswirkungen bei der Prozessausführung sind mit der sicheren produktions-synchronen Materialversorgung pro Taktbereich und Arbeitsplatz nach dem JIT- oder JIS-Prinzip zu begründen. Durch die Anlieferung arbeitsplatzspezifisch vorkommissionierter Versorgungspakete erfolgt eine systematische und arbeitsplatznahe Lagerung kleinster Bestände und damit verbunden einer Reduzierung der Zwischenlagerungen und Lagerflächenbedarfe auf der Baustelle. Dies wiederum führt zu einer Reduzierung der Behinderungen zwischen Baulogistik- und Ausführungsprozessen und zu einer stabileren Bauprozessausführung. Durch die Möglichkeit über das Warenverteilzentrum eine Baustellenversorgung außerhalb der Zeiten der Bauprozessausführung zu realisieren, werden mögliche Konflikte zwischen Baulogistik- und Ausführungsprozessen weiter reduziert. Des Weiteren führen die genannten Aspekte zu einer Reduzierung der Verschwendung auf der Baustelle in Form von Such- und Wartezeiten, Lagerbeständen und Transporten zur sowie auf der Baustelle selbst. Neben der Verschwendungsreduzierung resultiert auch aus der beim Warenverteilzentrum vorhandenen personellen Trennung der Ausführungs- und Baulogistikprozesse eine prozentuale Erhöhung der Haupttätigkeiten der Arbeitskräfte. Ferner wird die Prozessausführung durch die standardisierten Lieferprozesse zwischen Warenverteilzentrum und Baustelle sowie die erhöhte Lieferzuverlässigkeit und dem damit verbundenen stabilen Material-Input positiv beeinflusst.

Die Prozesssteuerung und -regelung sowie die Organisation und Koordination werden durch das Warenverteilzentrum dahingehend positiv beeinflusst, dass durch die Einbindung eines Warenverteilzentrums eine zentrale Instanz zur Ausführung, Steuerung und Regelung sowie zur Koordination und Organisation der Baustellenversorgungsprozesse entsteht. Es wird die Grundlage für ein mesologisches, gewerke- und subsystemübergreifendes baulogistisches Gesamtsystem geschaffen, welches die Prozesse der Produzenten und Zulieferer integriert und die zielführende Synchronisation von Versorgungstakt und Bauproduktionstakt ermöglicht. Die Material- und Informationsflusssteuerung sowie die Anlieferungsorganisation erfolgen ebenso wie die Ausführung standardisiert, zentral und unternehmensübergreifend. Der

Routenverkehr zwischen Warenverteilzentrum und Baustelle ersetzt bspw. die Durchführung, Organisation, Koordination sowie Steuerung der zahlreichen direkten Baustellenversorgungsprozesse der einzelnen gewerkespezifischen Lieferanten. Durch die Standardisierung und die o. g. zentrale Instanz werden die Baustellenführungskräfte der einzelnen Unternehmen entlastet und können sich anstelle bauleistender Aufgaben verstärkt mit ihren Kernprozessen beschäftigen.

Die positiven Auswirkungen auf die Nachhaltigkeit sind darauf zurückzuführen, dass durch das Warenverteilzentrum die Fahrzeuganzahl zur Baustelle und somit das innerstädtische Verkehrsaufkommen und der damit verbundene Emissionsausstoß reduziert werden. Darüber hinaus wird die Fahrzeugauslastung erhöht sowie die Fahrstrecken und -zeiten der Hersteller und Lieferanten reduziert. Einen weiteren positiven Einfluss hat der Einsatz von emissionsarmen Fahrzeugen im Rahmen des Routenverkehrs.

Die Umsetzung eines Warenverteilzentrums ist projektindividuell zu analysieren sowie zu bewerten und ist in der Phase der Bauleistungsinitiierung zu entscheiden. Für den Fall der Umsetzung ist das Warenverteilzentrum einem Planungsprozess entsprechend dem erweiterten Bauleistungsprozessmodell zu unterwerfen.

Im Hinblick auf die Steuerung und Regelung sowie die Organisation und Koordination von bauleistenden Prozessen respektive des Warenverteilzentrums ist ein durchgängiger, automatisierter, systematisierter und digitalisierter Informationsfluss und -austausch sowie eine verbesserte Kommunikation aller Prozessbeteiligten nötig. Diesen Anforderungen kann mit einem Informationsversorgungssystem, das auf einer automatisierten Bauleistungsidentifikation in Echtzeit basiert, entsprochen werden. Das entwickelte prozessorientierte polysensorale System ermöglicht eine automatisierte Erfassung, Verarbeitung, Digitalisierung, Analyse, Kommunikation und Dokumentation sensorisch erfasster Daten in Echtzeit und dadurch die o. g. erforderliche Bauleistungsidentifikation in Echtzeit. Es erfolgt eine systematische, digitale und automatische Verknüpfung und Vereinigung der Informations- und Materialflüsse. Die Materialflüsse werden kontinuierlich sensorisch erfasst, überwacht und digital abgebildet. Die vorhandenen Informationslücken bei bauleistenden Prozessen werden geschlossen und der Informationsfluss nachvollziehbarer und transparenter dokumentiert. Das polysensorale System erfasst bspw. Materialstandorte, Materialbestände sowie Transportprozesse und Einbaupunkte der o. g. vorkommissionierten Versorgungspakete in Echtzeit und fördert somit die Prozesstransparenz und Prozessqualität. Neben der reinen Informationsversorgung und -darstellung ermöglicht der Systemablauf die Daten respektive Informationen aufbauend auf der Prozessidentifikation auch für Prozessanalysen, Plan-Soll-Ist-Vergleiche, Nachkalkulationen, Prognosen oder die Kenngrößenermittlung und -speicherung zu nutzen. Durch die Identifikation des Prozessstatus und die automatisierte Erfassung von Ist-Größen unterstützt das entwickelte System die aktive Steuerung und Regelung der Bauproduktionsprozesse und

liefert Input-Parameter für die Bauprozessbewertung und -beurteilung. Eine aufwändige manuelle und fehleranfällige Erfassung dieser Input-Parameter ist nicht mehr nötig. Es erfolgen weniger Medienbrüche und die Datenqualität und -quantität werden erhöht. Neben der automatisierten Erfassung von Input-Parametern erfahren die Prozessverantwortlichen auch durch die automatische Benachrichtigung in Echtzeit im Falle von Abweichungen oder Störungen eine Unterstützung im Kontext des Bauprozessmanagements. Die Informationsdarstellung und -aufbereitung des Informationsversorgungssystems sowie die automatischen Benachrichtigungen erfolgen über Dashboards oder Plug-ins in Bauwerksmodellen und bieten den Prozessverantwortlichen eine zusätzliche Unterstützung.

Zusammenfassend zeigt das entwickelte polysensorale System, dass eine ereignisbasierte aktive Steuerung und Regelung von bauleistungsprozessen umfassend möglich ist. Damit verbundene Informationsversorgungssysteme unterstützen das Bauprozessmanagement in Echtzeit und bieten ein hohes Potenzial für Effizienzsteigerungen in der Bauausführung. Durch die kontinuierliche Weiterentwicklung der Sensoren sowie der Funk- und Kommunikationssysteme vereinfacht sich zum einen die Datenerfassung und zum anderen erhöht sich deren Qualität. Dies geht einher mit einem wirtschaftlicheren Einsatz und einer höheren Akzeptanz der Systeme. Ferner führt die kontinuierliche Weiterentwicklung zu einer Verbesserung hinsichtlich der Datenaufbereitung und Datenauswertung. Polysensorale Systeme werden somit für den baubetrieblichen Einsatz zunehmend an Bedeutung gewinnen.

Neben dem erläuterten Mehrwert des Systems im Kontext des Bauprozessmanagements in Echtzeit dient das System auch der Nachhaltigkeitsberichterstattung sowie der Nachweiserfüllung der Kriterienkataloge und Bewertungsrichtlinien der Zertifizierungssysteme. Das System stellt ein Instrument dar, das es ermöglicht, die aus der Nachhaltigkeitsberichterstattung und den Zertifizierungssystemen resultierenden und erforderlichen Informationen zu generieren. Das entwickelte polysensorale System stellt somit nicht nur ein Informationsversorgungssystem für das Bauprozessmanagement in Echtzeit sowie die aktive Bauprozesssteuerung und -regelung dar, sondern ebenso für Nachhaltigkeitsbetrachtungen. Die Digitalisierung des Materialflusses schließt die Informationslücke bezüglich der relevanten Daten und Informationen für die Nachhaltigkeitsberichterstattung und die Zertifizierungssysteme.

Auf Grund seiner Flexibilität und Prozessorientierung kann das System bei weiteren Anwendungsfällen eingesetzt sowie für diese angepasst werden und dadurch u. a. weitere intelligente Bauteile generieren, die eine Verknüpfung der Material- und Informationsflüsse und somit die beschriebene verbesserte aktive Steuerung und Regelung der Baustellenversorgung ermöglichen. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass auch bei den weiteren Anwendungsfällen der arbeitende Mensch stets von zentraler Bedeutung ist und weder zu überfordern noch zu ersetzen ist. Ziel des Systems muss immer die Unterstützung des arbeitenden

Menschen sein. Hierzu zählen bspw. Entscheidungen, Interpretationen und Schlussfolgerungen des Menschen zu Ergebnissen, Daten und Informationen sowie die Bauprozessgestaltung und -steuerung.

Die beiden Hauptelemente des entwickelten Baustellenversorgungssystems, das Warenverteilzentrum und das polysensorale System, ergänzen und bedingen sich gegenseitig. Das polysensorale System bietet für das Warenverteilzentrum dahingehend einen Mehrwert, dass durch das Informationsversorgungssystem die Prozessausführung sowie die aktive Prozesssteuerung und -regelung unterstützt werden. Das polysensorale System wiederum profitiert von den standardisierten und zentralisierten Prozessen innerhalb des Warenverteilzentrums und ermöglicht eine einfachere Umsetzung des Systems. So wird bspw. durch die eindeutige Identifikation sowie die Gewichts- und Positionserfassung der intelligenten Palette innerhalb des Warenverteilzentrums, der Baustelle und dem Taktbereich oder Arbeitsplatz der Materialfluss verbessert und die Synchronisation zwischen Bauproduktions- und Versorgungstakt erleichtert. Ferner vereinfacht sich durch die Lagerung der vorkommissionierten Versorgungspakete auf der intelligenten Palette und dem damit verbundenen Informationsfluss neben der Durchführung auch die Steuerung und Regelung der taktgenauen Versorgung der Arbeitsplätze.

Das Fazit wird mit einer komprimierten Beantwortung der Forschungsfragen abgeschlossen.

- Welche Schwachstellen sind gegenwärtig in der Planung, Organisation und Realisierung der Baulogistik vorhanden?

Die Planung und Organisation der Baulogistik ist verstärkt darauf abzustellen, dass die Realisierung zentralisiert sowie gewerke- und subsystemübergreifend erfolgt und derzeit vorhandene Medien- sowie Informationsbrüche und -verluste reduziert werden. Die Planung und Organisation hat die Grundlagen dafür zu schaffen, dass die vorgelagerten Produktions- und Logistikprozesse sowie die Bauproduktions- und Baulogistikprozesse in der Phase der Baulogistikrealisierung unternehmensübergreifend berücksichtigt, synchronisiert und ausgeführt werden. Bereits in der Planung sind die Prozesse der Zulieferer und Produzenten intensiv zu berücksichtigen. Die vorgelagerten Prozesse der Produktion und der Logistik sowie der Bauproduktion und Baulogistik sind zu übergeordneten Prozess- und Wertschöpfungsketten zusammenzuführen. Vorhandene Instrumente zur Organisation und Realisierung wie bspw. Avisierungssysteme werden aktuell nicht vollumfänglich benutzt und weisen bei ihrer Anwendung Verbesserungspotenziale auf. JIT-Transporte stellen in der gegenwärtigen Realisierung der Baulogistik eine Ausnahme dar. Lagertransporte sind dominant. Die Phase der Baulogistikrealisierung weist innerhalb der baulogistischen Prozesse Verschwendungen in Form von nicht wertschöpfenden und gleichzeitig nicht notwendigen Tätigkeiten auf.

- Welche Methoden führen zu einer Verbesserung dieser Schwachstellen?

Durch das Konzept des Warenverteilzentrums kann eine zielführende Synchronisation von Versorgungstakt und Bauproduktionstakt erfolgen und eine zentrale Instanz zur Ausführung, Steuerung und Regelung sowie zur Koordination und Organisation der Baustellenversorgungsprozesse eingerichtet werden. Ferner können die Prozesse der Produzenten und Zulieferer integriert werden. Das Warenverteilzentrum führt zu einer Verschwendungsreduzierung sowie zu stabileren Baustellenversorgungsprozessen und somit zu einer stabileren Bauproduktion. Die Material- und Informationsflusssteuerung sowie die Anlieferungsorganisation erfolgen ebenso wie die Ausführung standardisiert, zentral und unternehmensübergreifend.

Zur Verbesserung des Informationsflusses und -austauschs ist ein Informationsversorgungssystem zu implementieren, das für einen durchgängigen, automatisierten, systematisierten und digitalisierten Informationsfluss und -austausch sorgt. Es ist eine systematische, digitale und automatische Verknüpfung und Vereinigung der Informations- und Materialflüsse zu realisieren. Dafür ist eine automatisierte Bauprozessidentifikation in Echtzeit über ein prozessorientiertes polysensorales System notwendig.

- Welche technologischen Mittel der Digitalisierung können die Baulogistik unterstützen?

Durch die evaluierte sensorische Erfassung von Messgrößen innerhalb des entwickelten polysensoralen Systems sowie die automatisierte Prozessidentifikation werden Input-Parameter für ein baulogistisches Informationsversorgungssystem generiert. Die Materialflüsse werden über Sensoren kontinuierlich erfasst und im weiteren Systemablauf dem Bauprozessmanagement in Echtzeit sowie der aktiven Bauprozesssteuerung und -regelung zugeführt. Es erfolgt eine Digitalisierung des Materialflusses und eine Verknüpfung zwischen Material- und Informationsfluss. Das polysensorale System ermöglicht eine automatisierte Erfassung, Verarbeitung, Digitalisierung, Analyse, Kommunikation und Dokumentation sensorisch erfasster baulogistischer Daten in Echtzeit.

Zur Informationsdarstellung und -aufbereitung sind Bauwerksmodelle zu nutzen. Es ist eine bidirektionale Kommunikation zwischen Realität und Modell anzustreben, die sich an dem Konzept des digitalen Zwillings orientiert.

- Wie ist das zu entwickelnde ganzheitliche sowie zentral gesteuerte und unternehmensübergreifende Baustellenversorgungssystem zu gestalten und in das bestehende Baulogistikprozessmodell zu integrieren?

Das Baustellenversorgungssystem basiert auf einem Warenverteilzentrum in Kombination mit dem entwickelten polysensoralen System und wird durch Ansätze der Lean Logistics sowie die Nutzung von Bauwerksmodellen unterstützt.

Die Entscheidung zur Umsetzung des Baustellenversorgungssystems hat in der Phase der Baulogistikinitiierung zu erfolgen. Der darauffolgende Planungsprozess hat sich an dem erweiterten Baulogistikprozessmodell zu orientieren. Dieses beinhaltet u. a. eine Analyse, Präzisierung und Erweiterung der Baulogistikattribute, die Anwendung weiterer Planungswerkzeuge wie bspw. die entwickelte Materialeignungsanalyse und die Formulierung eines spezifischen Baulogistikhandbuchs für das Baustellenversorgungssystem.

6.3 Ausblick

Hinsichtlich des Konzepts des Warenverteilzentrums sind die Analysen und Bewertungen um Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen zu erweitern. Hierzu sind Untersuchungen durchzuführen, die die anfallenden Kosten der Planung, Errichtung und Betrieb des Warenverteilzentrums quantifizieren und den ebenfalls zu quantifizierenden Kostenreduzierungen, die aus der Nutzung des Warenverteilzentrums resultieren können, gegenüberstellen.

Das polysensorale System stellt einen Prototyp dar, bei dem die Evaluation nicht vollumfänglich auf der Baustelle erfolgte. Es gilt daher in einem nächsten Schritt die Umsetzung des Systems innerhalb von praxisorientierten Einsätzen auf der Baustelle voranzutreiben. Darüber hinaus ist die Erweiterung des Systems durch die Nutzung von bildgebenden Sensoren zur Aufnahme von Ist-Qualitäten sowie die Messung und Auswertung des Ankunfts winkels des BLE-Signals zur Verbesserung der Zonenerkennung zu untersuchen.

Die angestrebte Integration von externen Systemen, wie bspw. Buchhaltungs-, Warenwirtschafts- oder Lagerverwaltungssysteme, innerhalb des polysensoralen Systems konnte auf Grund des Umfangs im Rahmen des Forschungsvorhabens nicht umgesetzt werden. Im Sinne der angestrebten Betrachtung der Baustellenversorgungsprozesse gemäß eines Supply-Chain-Managements kann folglich als weiteres Forschungspotenzial die Ergänzung dieser Systeme sowie die Untersuchung zu den entsprechenden Schnittstellen identifiziert werden. Als prioritär ist hierbei die Ermittlung von stichtagsbezogenen Ist-Kosten zu behandeln. Darüber hinaus ist die Anbindung von Bauwerksmodellen weiter voranzutreiben. Hierbei ist wie bei den o. g. externen Systemen ein bidirektionaler Austausch mit dem polysensoralen System anzustreben. Dies ermöglicht einen automatisierten Datenaustausch in Echtzeit und unterstützt die Umsetzung des Ansatzes des digitalen Zwillings. Ferner sollte im Kontext der Integration von externen Systemen die Umsetzung von virtuellen Warenverteilzentren erforscht werden.

In Bezug auf die Integration und Nutzung von Bauwerksmodellen ist ein BIM-Fachmodell Baulogistik zu entwickeln. Die Attribuierung der Objekte ist mit definierten Daten und Informationen zu baulogistischen Parametern zu erweitern. Die damit einhergehende Standardisierung ermöglicht einen zielführenden Daten- und Informationsaustausch zwischen den Bauprojektbeteiligten und damit verbunden eine intensivere Berücksichtigung von baulogistischen Aspekten in der Planungs- und Ausführungsphase von Bauprojekten. Dies geht einher mit einer Verbesserung der baulogistischen Prozesse durch bspw. einen modellbasierten und standardisierten Materialabruf oder die in dieser Arbeit bereits erläuterte Nutzung der Bauwerksmodelle als Instrument zur Informationsdarstellung und -aufbereitung. Des Weiteren sind die Aspekte eines digitalen Warenkorbs sowie eines digitalen Bestands zu untersuchen und durch das BIM-Fachmodell Baulogistik zu ermöglichen. Zur verbesserten Planung und

Durchführung der Synchronisation des Versorgungs- und Bauproduktionstakts sind baulegische Bauwerksmodelle mit denen der Bauablaufplanung zu verknüpfen und aufeinander abzustimmen.

Zukünftig wird die Informationsverarbeitung innerhalb von Informationsversorgungssystemen durch Methoden der Künstlichen Intelligenz geprägt und durchgeführt werden. Es gilt daher, das entwickelte baulegische Informationsversorgungssystem dahingehend zu untersuchen, inwiefern entsprechende Analyseverfahren genutzt werden können und dem Systemanwender einen Mehrwert bieten. Der Mehrwert besteht dabei darin, dass die entsprechenden Analyseverfahren Entscheidungsvorlagen generieren, auf Basis derer der Mensch die abschließende Entscheidung trifft.

Die im Verlauf der vorliegenden Arbeit andiskutierten Einflüsse der Baulegistik auf Aspekte der Nachhaltigkeit sollten einen wesentlichen Gegenstand der zukünftigen Forschung auf dem Gebiet der Baulegistik darstellen. Die hierdurch zu hebenden Potenziale und Möglichkeiten scheinen immens.

Literaturverzeichnis

Al Dandan, Majd (2019): Eine Untersuchung zur Lagerhaltung auf Baustellen von Baustoffen im Ausbau. Betreuer: Kleiner, Jonas. Darmstadt, Technische Universität, Institut für Baubetrieb, Bachelorthesis 2019.

Albrecht, Matthias (2015): Building Information Modeling (BIM) in der Planung von Bauleistungen. Hamburg: disserta Verlag 2015.

Arbulu, Robert; Ballard, Glenn (2004): Lean supply systems in construction. https://www.researchgate.net/publication/292225035_Lean_supply_systems_in_construction, Zugriff: 20. April 2023.

Arndt, Markus (2020): Eine Analyse von Bauhöfen – Erstellung eines Konzeptes zur Organisation von Bauhöfen und deren Prozessstrukturen. Betreuer: Kleiner, Jonas. Darmstadt, Technische Universität, Institut für Baubetrieb, Masterthesis 2020.

Arnold, Dieter; Isermann, Heinz; Kuhn, Axel; Tempelmeier, Horst; Furmans, Kai (2008): Handbuch Logistik. 3. Auflage – Berlin et al.: Springer Verlag 2008.

Ballou, Roland H. (2004): Business Logistics/ Supply Chain Management. New Jersey: Pearson 2004.

Bauer, Hermann (2007): Baubetrieb. 3. Auflage – Berlin et al.: Springer Verlag 2007.

Bauernhansl, Thomas (2014): Die Vierte Industrielle Revolution – Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma. In: Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik; S. 5-35. Hrsg.: Bauernhansl, Thomas; ten Hompel, Michael; Vogel-Heuser, Birgit. Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag 2014.

Bauindustrie//aktuell (2018): Trends der Digitalisierung in der Bauindustrie. In: Bauindustrie//aktuell; 1. Quartal (2018); S. 4-7. Hrsg.: Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e. V..

Baumgarten, Helmut (2008): Das Beste der Logistik – Auf dem Weg zu logistischer Exzellenz. In: Das Beste der Logistik. Innovationen, Strategien, Umsetzungen; S. 13-19. Hrsg.: Baumgarten, Helmut. Berlin et al.: Springer Verlag 2008.

Baun, Christian (2015): Computernetze kompakt. 3. Auflage – Berlin et al.: Springer Vieweg Verlag 2015.

Becker, Torsten (2018): Prozesse in Produktion und Supply Chain optimieren. 3. Auflage – Berlin: Springer Vieweg Verlag 2018.

Bendel, Oliver (2019): 350 Keywords Digitalisierung. Wiesbaden: Springer Gabler Verlag 2019.

Berner, Fritz; Maier, Stefan; von Heyl, Jakob; Spieth, Philipp; Binder, Florian; Kuhn, Alexander (2018): Prototypische Entwicklung eines BIM-Instruments für die Bestellung, Lieferung und Dokumentation von Transportbeton. In: Bauingenieur; Band 93; Juni 2018; S. 260-264.

- Bertelsen, Sven; Nielsen, Jorgen (1997):** Just-In-Time Logistics in the Supply of Building Materials. In: 1st International Conference on Construction Industry Development: Building the future Together, Singapur, Dezember 1997.
- Bichler, Klaus; Krohn, Ralf; Philippi, Peter; Schneidereit, Frank (2017):** Kompakt-Lexikon Logistik. 3. Auflage – Wiesbaden: Springer Gabler Verlag 2017.
- Binder, Florian (2014):** Ereignisbasierte Steuerung bauleistungsprozesse mit Echtzeit-Ortungssystemen. Darmstadt: Eigenverlag 2014. Zugleich: Darmstadt, Technische Universität, Institut für Baubetrieb, Dissertation 2014.
- Blömeke, Michael (2001):** Die Baustellenlogistik als neues Dienstleistungsfeld im Schlüsselfertigbau. Grundlegende Entwicklung eines systematisierten Logistikkonzeptes und dessen Umsetzung am Bauvorhaben Konzerthaus Dortmund. Betreuer: Blecken, Udo; Boenert, Lothar. Dortmund, Universität, Fakultät Bauwesen, Diplomarbeit 2001.
- Blum, Hannes Stephan (2006):** Logistik-Controlling. Kontext, Ausgestaltung und Erfolgswirkungen. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag / GWV Fachverlage GmbH 2006. Zugleich: Vallendar, Wissenschaftliche Hochschule für Unternehmensführung (WHU), Dissertation 2006.
- Boenert, Lothar; Blömeke, Michael (2003):** Logistikkonzepte im Schlüsselfertigbau zur Erhöhung der Kostenführerschaft. In: Bauingenieur; Band 78; Juni 2003; S. 277-283.
- Boppert, Julia; Lügger, Marc; Durchholz, Janina (2013):** Entwicklungsströme und Trends in der schlanken Prozessgestaltung. In: Lean Logistics. Methodisches Vorgehen und praktische Anwendungen in der Automobilindustrie; S. 11-25. Hrsg.: Günthner, Willibald A.; Boppert, Julia. Berlin et al.: Springer Vieweg Verlag 2013.
- Borrmann, André; Günthner, Willibald A.; Horenburg, Tim; König, Markus; Mack, Jürgen; Pfaff, Stefan; Steinhauer, Dirk; Wimmer, Johannes (2011):** Simulationsgestützte Bauablaufplanung. In: Digitale Baustelle – innovativer Planen, effizienter Ausführen. Werkzeuge und Methoden für das Bauen im 21. Jahrhundert; S. 159-204. Hrsg.: Günthner, Willibald A.; Borrmann, André. Berlin et al.: Springer Verlag 2011.
- Borrmann, André; König, Markus; Koch, Christian; Beetz, Jakob (2015):** Building Information Modeling. Technologische Grundlagen und industrielle Praxis. Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag 2015.
- Bousonville, Thomas (2017):** Logistik 4.0. Die digitale Transformation der Wertschöpfungskette. Wiesbaden: Springer Gabler Verlag 2017.
- Brell-Cokcan, Sigrid; Haarhoff, Daniel; Kuhnhenne, Markus; Feldmann, Markus; Reisinger, Uwe (2017):** Potenziale und Herausforderungen für den Einsatz von Robotik im Bauwesen – Automatisierung und Robotik im Stahlbau. In: Bauingenieur. Jahresausgabe VDI-Bautechnik 2017/2018; S. 136-144. Hrsg.: VDI-Fachbereich Bautechnik. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag 2017.
- Bretzke, Rüdiger (2020):** Logistische Netzwerke. 4. Auflage – Berlin: Springer Vieweg Verlag 2020.
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (2019):** Beitrag der Digitalisierung zur Produktivität in der Baubranche.

Hrsg.: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung. Bonn: Eigenverlag 2019.

Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (2019): Leitfaden Nachhaltiges Bauen. Zukunftsfähiges Planen, Bauen und Betreiben von Gebäuden. Hrsg.: Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat. Berlin: Eigenverlag 2019.

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2015): Stufenplan Digitales Planen und Bauen. Einführung moderner, IT-gestützter Prozesse und Technologien bei Planung, Bau und Betrieb von Bauwerken. Hrsg.: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Berlin: Eigenverlag 2015.

Burmeister, Yannick (2019): Durchführung einer Laborstudie zur Lokalisierung von Baustoffen mittels sensorgestützter IoT-Technologie. Betreuer: Kleiner, Jonas. Darmstadt, Technische Universität, Institut für Baubetrieb, Masterthesis 2019.

Caliskan, Habibe (2021): Eine Analyse zu den Bestellprozessen von Baustoffen in der Bauwirtschaft aus Sicht der Baustelle. Kleiner, Jonas. Darmstadt, Technische Universität, Institut für Baubetrieb, Bachelorthesis 2021.

Campbell, Jonathan; MacPhail, Lynsey; Cornelis, Geoffrey (2010): Freight Consolidation Centre Study – Final Report. Hrsg.: Scott Wilson Ltd. Glasgow: Eigenverlag 2010.

Clausen, Uwe; Weber, Jörg (2010): Nutzung von Gebäudedaten in der Baulogistik. In: Baulogistik – Konzepte für eine bessere Ver- und Entsorgung im Bauwesen; S. 43-48. Hrsg.: Clausen, Uwe. Dortmund: Verlag Praxiswissen 2010.

COUNT+CARE (2018): LoRaWAN – Allgemein. Präsentationsfolien zum Projekttreffen am 01. Oktober 2018 in Darmstadt.

Denzer, Michael (2019): Entwicklung eines Kooperationsmodells für die Transportlogistik im Baustoff-Fachhandel. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2019. Zugleich: Karlsruhe, Institut für Technologie, Institut für Technologie und Management im Baubetrieb, Dissertation 2019.

Denzer, Michael; Haghsheno, Shervin (2016): Der Baustoff-Fachhandel als Akteur in der baubetrieblichen Wertschöpfungskette – Ergebnisse einer Online-Befragung. In: Tagungsband 27. BBB-Assistententreffen; S. 43-61. Hrsg.: Schach, Rainer; Jehle, Otto. Dresden: Eigenverlag 2016.

Department for Transport (2007): Freight Best Practice. London Construction Consolidation Centre – Case Study. Hrsg.: Department for Transport / Transport for London. London: Eigenverlag 2007.

Der Deutsche Nachhaltigkeitskodex: <https://www.deutscher-nachhaltigkeitskodex.de/de-DE/Home/Berichtspflichten/CSRD>, Zugriff: 20. April 2023.

Deuringer, Lena Christine (2021): Eine Untersuchung zum Einsatz des Baulogistikprozessmodells und zur Bewertung der baulogistischen Komplexität in Abhängigkeit der Unternehmenseinsatzform. Betreuer: Kleiner, Jonas. Darmstadt, Technische Universität, Institut für Baubetrieb, Masterthesis 2021.

- Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V. (2020a):** DGNB Leitfaden – Ihr Weg zum klimaneutralen Gebäude. Hrsg.: Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V.. Stuttgart: Eigenverlag 2020.
- Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V. (2020b):** Rahmenwerk für klimaneutrale Gebäude und Standorte. Hrsg.: Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V.. Stuttgart: Eigenverlag 2020.
- Deutsche Telekom AG (2020a):** Digitalisierungsindex Mittelstand 2020/2021. Der digitale Status quo des deutschen Mittelstands. Hrsg.: Deutsche Telekom AG. Bonn: Eigenverlag 2020.
- Deutsche Telekom AG (2020b):** Digitalisierungsindex Mittelstand 2020/2021. Der digitale Status quo im deutschen Baugewerbe. Hrsg.: Deutsche Telekom AG. Bonn: Eigenverlag 2020.
- DGNB GmbH (o. J.):** Baustelle von Anfang an nachhaltig. Hrsg.: DGNB GmbH. Stuttgart: Eigenverlag.
- DGNB GmbH (o. J.):** DGNB System – Kriterienkatalog Nachhaltige Baustelle – 1-BS Baustellenorganisation. Hrsg.: DGNB GmbH. Stuttgart: Eigenverlag.
- DGNB GmbH (o. J.):** DGNB System – Kriterienkatalog Nachhaltige Baustelle – 2-BS Ressourcenschutz. Hrsg.: DGNB GmbH. Stuttgart: Eigenverlag.
- DGNB GmbH (o. J.):** DGNB System – Kriterienkatalog Nachhaltige Baustelle – Systemgrundlagen Nachhaltige Baustelle. Hrsg.: DGNB GmbH. Stuttgart: Eigenverlag.
- DGNB GmbH:** <https://www.dgnb-system.de/de/gebaeude/baustelle/>, Zugriff: 20. April 2023.
- DIN EN 14943:2006-03:** Transportdienstleistungen – Logistik – Glossar. Hrsg.: Deutsches Institut für Normung. März 2006.
- Dror, Erez; Zhao, Jianyu; Sacks, Rafael; Seppänen, Olli (2019):** Indoor Tracking of Construction Workers Using BLE: Mobile Beacons and Fixed Gateways vs. Fixed Beacons and Mobile Gateways. In: Proceedings 27th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC); S. 831-842.
- Durchholz, Janina (2013):** Zehn Leitlinien für eine schlanke Logistik. In: Lean Logistics. Methodisches Vorgehen und praktische Anwendungen in der Automobilindustrie; S. 43-58. Hrsg.: Günthner, Willibald A.; Boppert, Julia. Berlin et al.: Springer Vieweg Verlag 2013.
- Dzięgielewski, Piotr; Kaczorek, Krzysztof; Kleiner, Jonas; Gonzalez Martin, Ana; Fernandez Marin, Marcos; Mehr, Oliver; Mendiola, Elisa; Minasowicz, Andrzej; Motzko, Christoph; Nicał, Aleksander; Nowak, Paweł; Rosłon, Jerzy; Schreiber, Wojciech; Zaleski, Janusz; Zawistowski, Jacek (2018):** Handbuch zur AR-basierten Anwendung von Schalungen und Gerüsten.
<https://www.arfat.il.pw.edu.pl/wp-content/uploads/2018/11/ARFAT-manual-DE.pdf>, Zugriff: 20. April 2023.
- Emken, Marco; Windbacher, Marc-Oliver (2021):** Baustoff-Handelskunde. 9. Auflage – Köln: Rudolf Müller Verlag 2021.
- Etter, Max (1998):** Baustellenlogistik für den Potsdamer Platz. In: Schweizer Ingenieur und Architekt; Band 116; Heft 23; Juni 1998; S. 428-433.

- Etter, Sebastian; Girmscheid, Gerhard (2012a):** Zentrales Logistikmanagement auf innerstädtischen Baustellen – Strategische Umsetzung. In: Bauingenieur; Band 87; November 2012; S. 461-469.
- Etter, Sebastian; Girmscheid, Gerhard (2012b):** Zentrales Logistikmanagement auf innerstädtischen Baustellen – Operative Umsetzung. In: Bauingenieur; Band 87; November 2012; S. 470-479.
- Europäische Kommission (2022):** RICHTLINIE (EU) 2022/2464 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 14. Dezember 2022 zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 537/2014 und der Richtlinien 2004/109/EG, 2006/43/EG und 2013/34/EU hinsichtlich der Nachhaltigkeitsberichterstattung von Unternehmen. In: Amtsblatt der Europäischen Union. L 322; S. 15-80. Hrsg.: Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union. Luxemburg: Eigenverlag 2022.
- Farid, Opjani (2021):** Eine Analyse zur JIT-Belieferung in der stationären Industrie und deren Übertragbarkeit auf die Bauindustrie. Betreuer: Kleiner, Jonas. Darmstadt, Technische Universität, Institut für Baubetrieb, Masterthesis 2021.
- Feucht, Thilo; Lange, Jörg; Erven, Maren; Borg, Christopher; Kanaack, Ulrich; Waldschmitt, Benedikt (2020):** Additive manufacturing by means of parametric robot programming. In: Construction Robotics; Volume 4; issue 1-2; Juni 2020; S. 31-48.
- Fiedler, Martin (2018):** Das Toyota-Production-System – TPS. In: Lean Construction – Das Managementhandbuch. Agile Methoden und Lean Management im Bauwesen; S. 39-63. Hrsg.: Fiedler, Martin. Berlin: Springer Verlag 2018.
- Fincke, Elena (2019):** Eine Analyse zur Verwaltung von Großgeräten im Tief- und Straßenbau. Betreuer: Kleiner, Jonas. Darmstadt, Technische Universität, Institut für Baubetrieb, Masterthesis 2019.
- Fischer, Rigbert (2014):** Eine Untersuchung zur roboterbasierten Baugruppenfertigung im Stahlbau. Darmstadt: Eigenverlag 2014. Zugleich: Darmstadt, Technische Universität, Institut für Baubetrieb, Dissertation 2014.
- Fleischmann, Bernhard (2018):** Begriffliche Grundlagen der Logistik. In: Begriff der Logistik, logistische Systeme und Prozesse; S. 1-16. Hrsg.: Tempelmeier, Horst. Berlin: Springer Vieweg Verlag 2018.
- Fleischmann, Bernhard; Kopfer, Herbert (2018):** Systeme der Transportlogistik. In: Begriff der Logistik, logistische Systeme und Prozesse; S. 17-28. Hrsg.: Tempelmeier, Horst. Berlin: Springer Vieweg Verlag 2018.
- Franke, Werner; Dangelmaier, Wilhelm (2006):** RFID – Leitfaden für die Logistik. Einsatzmöglichkeiten, Integration, Praxisbeispiele. Wiesbaden: Gabler Verlag / GWV Fachverlage GmbH 2009.
- Franz, Volkhard; Funk, Thorsten (2007):** Kosteneinsparungen und Rationalisierungseffekte durch ein zentrales Logistikmanagement im Wohnungsbau. Kassel, Universität, Institut für Bauwirtschaft, Forschungsbericht 2007.
- Freiwald, Stephanie (2005):** Supply Chain Design. Frankfurt am Main et al.: Peter Lang GmbH / Europäischer Verlag der Wissenschaften 2005. Zugleich: Bochum, Universität, Institut für Unternehmensführung, Dissertation 2005.

- Gammersbach, Justin (2021):** Erstellung von Projektprofilen im Kontext des Systems „Warenverteilzentrum“ in der Bauwirtschaft. Betreuer: Kleiner, Jonas. Darmstadt, Technische Universität, Institut für Baubetrieb, Bachelorthesis 2021.
- Ganeswaran, Kajanan (2019):** Eine Untersuchung zum Bestellprozess von Baustoffen und Baugeräten in der Bauwirtschaft. Betreuer: Kleiner, Jonas. Darmstadt, Technische Universität, Institut für Baubetrieb, Masterthesis 2019.
- Girmscheid, Gerhard (2007):** Forschungsmethodik in den Baubetriebswissenschaften. Hrsg.: Girmscheid, Gerhard. 2. Auflage – Zürich: Eigenverlag 2007.
- Girmscheid, Gerhard (2015):** Angebots- und Ausführungsmanagement – prozessorientiert. Erfolgsorientierte Unternehmensführung. 3. Auflage – Berlin et al.: Springer Vieweg Verlag 2015.
- Girmscheid, Gerhard; Motzko, Christoph (2013):** Kalkulation, Preisbildung und Controlling in der Bauwirtschaft. Produktionsprozessorientierte Kostenberechnung und Kostensteuerung. 2. Auflage – Berlin et al.: Springer Vieweg Verlag 2013.
- GLCI (2019):** Lean Construction. Begriffe und Methoden. Hrsg.: German Lean Construction Institute – GLCI e. V.. Karlsruhe: Eigenverlag 2019.
- Gleißner, Harald; Femerling, J. Christian (2008):** Logistik. Grundlagen – Übungen – Fallbeispiele. Wiesbaden: Gabler Verlag / GWV Fachverlage GmbH 2008.
- Goger, Gerald (2017):** Thesen zur Zukunft des Baubetriebs. In: Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko; S. 191-203. Hrsg.: Fenner, Jörg. Darmstadt: Eigenverlag 2017.
- Goger, Gerald; Bisenberger, Tobias (2019):** Der Baumeister in 50 Jahren. In: ÖSTERREICHISCHE bauzeitung. Bauinnung Spezial. Der Baumeister: gestern – heute – morgen; April 2019; S. 26-28.
- Goger, Gerold; Piskernik, Melanie; Urban, Harald (2018):** Studie: Potenziale der Digitalisierung im Bauwesen. Analyse der Potenziale und Herausforderungen durch die zunehmende Digitalisierung der österreichischen Baubranche, Ableitung von Handlungsfeldern für zukünftige Forschung aus Sicht von Wissenschaft und Praxis. Wien, Technische Universität, Institut für Interdisziplinäres Bauprozessmanagement, Forschungsbericht 2018.
- Goger, Gerald; Breitwieser, Karina (2019):** Digitalisierung in der Bauindustrie – Status Quo, Vision, Potenziale und Voraussetzungen. In: Bauingenieur. Jahresausgabe VDI-Bautechnik 2019/2020; S. 115-123. Hrsg.: VDI-Fachbereich Bautechnik. Düsseldorf: VDI Fachmedien 2019.
- Gogic, Sandy (2021):** Durchführung einer Baustellenstudie zum sensorgestützten Supply-Chain-Management bei Fertigteilstützen aus Sicht der Baustelle. Betreuer: Kleiner, Jonas. Darmstadt, Technische Universität, Institut für Baubetrieb, Masterthesis 2021.
- Goldenberg, Ingo (2005):** Optimierung von Supply Chain Prozessen in der Bauwirtschaft durch mobile Technologien und Applikationen. Berlin: Mensch & Buch Verlag 2005. Zugleich: Darmstadt, Technische Universität, Institut für Baubetrieb, Dissertation 2005.
- Göpfert, Ingrid (2013):** Logistik. Führungskonzeption und Management von Supply Chains. 3. Auflage – München: Vahlen Verlag 2013.

- Gralla, Mike; Lenz, Lisa Theresa (2017):** Digitalisierung im Baubetrieb – Building Information Modeling und virtuelle Zwillinge. In: Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko; S. 205-216. Hrsg.: Fenner, Jörg. Darmstadt: Eigenverlag 2017.
- Gralla, Mike; Lenz, Lisa Theresa (2019):** Digitalisierungspotenziale im Rahmen der Kostenermittlung von Bauleistungen. In: Aktuelle Entwicklungen in Baubetrieb, Bauwirtschaft und Bauvertragsrecht. 50 Jahre Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft der TU Graz; S. 791-804. Hrsg.: Hofstadler, Christian. Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag 2019.
- Greve, Annika (2015):** Analyse der zeitlichen Verteilung bauleistungsprozesse im Rohbau zur Unterstützung automatisierter Avisierungsprozesse. Betreuer: Linnebacher, Fabian. Darmstadt, Technische Universität, Institut für Baubetrieb, Masterthesis 2015.
- Griebel, Bernhard (2000):** Der zeitnahe Soll-Ist-Vergleich aus Sicht der Baustelle. Berlin: Mensch & Buch Verlag 2000. Zugleich: Darmstadt, Technische Universität, Institut für Baubetrieb, Dissertation 2000.
- Grieser, Sebastian (2021):** Entwicklung von Projektprofilen im Kontext des Systems „Warenverteilzentrum“ in der Bauwirtschaft. Betreuer: Kleiner, Jonas. Darmstadt, Technische Universität, Institut für Baubetrieb, Bachelorthesis 2021.
- Groß, Christoph; Pfennig, Roland (2019):** Digitalisierung in Industrie, Handel und Logistik. Leitfaden von der Prozessanalyse bis zur Einsatzoptimierung. Wiesbaden: Springer Gabler Verlag 2019.
- Größe, Richard (2020):** Eine Untersuchung zum Vergabeprozess des Generalunternehmers bei Gewerken des Ausbaus. Betreuer: Kleiner, Jonas. Darmstadt, Technische Universität, Institut für Baubetrieb, Masterthesis 2020.
- Gudehus, Timm (2010):** Logistik. Grundlagen – Strategien – Anwendungen. 4. Auflage – Heidelberg et al.: Springer Verlag 2010.
- Guerlain, Cindy; Renault, Samuel; Ferrero, Francesco; Faye, Sébastien (2019a):** Decision Support Systems for Smarter and Sustainable Logistics of Construction Sites. In: Sustainability 11; no. 10: 2762.
- Guerlain, Cindy; Renault, Samuel; Ferrero, Francesco (2019b):** Understanding Construction Logistics in Urban Areas and Lowering Its Environmental Impact: A Focus on Construction Consolidation Centres. In: Sustainability 11; no. 21: 6118.
- Guntermann, Beate (1997):** Schlüsselfertiges Bauen – Logistik im Ausbau bei schlüsselfertiger Bauausführung. Betreuer: Blecken, Udo. Dortmund, Universität, Fakultät Bauwesen, Diplomarbeit 1997.
- Günthner, Willibald A.; Durchholz, Janina; Klenk, Eva; Boppert, Eva (2013):** Schlanke Logistikprozesse. Handbuch für den Planer. Berlin et al.: Springer Vieweg Verlag 2013.
- Günthner, Willibald A.; Klenk, Eva; Tenerowicz-Wirth, Peter (2014):** Adaptive Logistiksysteme als Wegbereiter der Industrie 4.0. In: Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik; S. 297-323. Hrsg.: Bauernhansl, Thomas; ten Hompel, Michael; Vogel-Heuser, Birgit. Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag 2014.
- Günthner, Willibald A.; Schneider, Oliver (2009):** RFID-Einsatz in der Baubranche: Entwicklung eines RFID-Systems mit mobilen Gates auf Baustellen zur schnellen Identifikation

und Verfolgung von Betriebsmitteln zwischen Baustellen und Werken. München, Technische Universität, Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Forschungsbericht 2009.

Günthner, Willibald A.; Zimmermann, Josef (2008): Logistik in der Bauwirtschaft. Status quo, Handlungsfelder, Trends und Strategien. Nürnberg: Bayern Innovativ 2008.

Habernicht, Ilka; Spieckermann, Sven; König, Markus (2011): Simulation der Baustellenlogistik am Beispiel eines Flugsteiges. In: Tagungsband Mefisto Kongress 2011; S. 133-144.

Hackenberg, Niklas (2020): Eine Analyse zur Lagerhaltung auf Baustellen von Baustoffen im Ausbau. Betreuer: Kleiner, Jonas. Darmstadt, Technische Universität, Institut für Baubetrieb, Masterthesis 2020.

Hammel, Felix Noel (2019): Eine Analyse zur Lagerhaltung auf Baustellen von Baustoffen im Ausbau. Betreuer: Kleiner, Jonas. Darmstadt, Technische Universität, Institut für Baubetrieb, Bachelorthesis 2019.

Hanes, David; Salgueiro, Gonzalo; Grossetete, Patrick; Barton, Robert; Henry, Jerome (2017): IoT Fundamentals: Networking Technologies, Protocols, and Use Cases for the Internet of Things. Indianapolis: Cisco Press 2017.

Hausladen, Iris (2011): IT-gestützte Logistik. Systeme, Prozesse, Anwendungen. Wiesbaden: Gabler Verlag 2011.

Hegmanns, Tobias; Maaß, Jan-Christoph; Toth, Michael (2008): Prozesse in Logistiknetzwerken – Supply Chain Management. In: Handbuch Logistik; S. 459-486. Hrsg.: Arnold, Dieter; Isermann, Heinz; Kuhn, Axel; Tempelmeier, Horst; Furmans, Kai. 3. Auflage – Berlin et al.: Springer Verlag 2008.

Heil, Florian (2019): Eine Untersuchung zu Avisierungsprogrammen für die Versorgungslogistik in der Bauwirtschaft. Betreuer: Kleiner, Jonas. Darmstadt, Technische Universität, Institut für Baubetrieb, Bachelorthesis 2019.

Heim, Marc (2002): Die zeitnahe Leistungsfeststellung auf Baustellen. Darmstadt: Eigenverlag 2002. Zugleich: Darmstadt, Technische Universität, Institut für Baubetrieb, Dissertation 2002.

Heimbürge, Uwe (1990): Beitrag zur rechnergestützten Vorbereitung der baustellenbezogenen TUL-Prozesse in der Ausführungsphase von Bauvorhaben (Expertensystem TUL-Ausbau). Weimar, Hochschule für Architektur und Bauwesen, Fakultät Naturwissenschaften und Technologie, Dissertation (A) 1990.

Heiserich, Otto-Ernst; Helbig, Klaus; Ullmann, Werner (2011): Logistik. Eine praxisorientierte Einführung. 4. Auflage – Wiesbaden: Springer Gabler Verlag 2011.

Hellrung, Erik (2021): Eine Untersuchung zur Avisierung der Vorgänge der Versorgungslogistik in der Bauwirtschaft. Betreuer: Kleiner, Jonas. Darmstadt, Technische Universität, Institut für Baubetrieb, Masterthesis 2021.

Helmus, Manfred; Kelm, Agnes; Laußat, Lars; Meins-Becker, Anica (2011): RFID-Baulogistikleitstand. Forschungsbericht zum Projekt "RFID-unterstütztes Steuerungs- und Dokumentationssystem für die erweiterte Baulogistik am Beispiel Baulogistikleitstand für die Baustelle". Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2011.

- Helmus, Manfred; Meins-Becker, Anica; Laußat, Lars; Kelm, Agnes (2009):** RFID in der Baulogistik. Forschungsbericht zum Projekt „Integriertes Wertschöpfungsmodell mit RFID in der Bau- und Immobilienwirtschaft. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH 2009.
- Hering, Ekbert; Schönfelder, Gert (2018):** Sensoren in Wissenschaft und Technik. Funktionsweise und Einsatzgebiete. 2. Auflage – Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag 2018.
- Hofstadler, Christian (2007):** Bauablaufplanung und Logistik im Baubetrieb. Berlin et al.: Springer Verlag 2007.
- Hofstadler, Christian (2009):** Beschaffungslogistik für die Phase Bauwerk-Rohbau, Berechnung der Anzahl der Transporte für Stahlbetonarbeiten unter Anwendung der Monte-Carlo-Simulation. In: Festschrift anlässlich des 30-jährigen Bestehens des Instituts für Baubetrieb der Technischen Universität Darmstadt. Baubetriebliche Aufgaben; S. 144-158. Hrsg.: Motzko, Christoph. Düsseldorf: VDI-Verlag 2009.
- Hofstadler, Christian (2019):** Aktuelle Entwicklungen in Baubetrieb, Bauwirtschaft und Bauvertragsrecht. 50 Jahre Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft der TU Graz. Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag 2019.
- Hofstadler, Christian (2021):** Multisystemische Hybridpyramide für den agilen Baubetrieb. In: Agile Digitalisierung im Baubetrieb – Grundlagen, Innovationen, Disruptionen und Best Practices; S. 3-45. Hrsg.: Hofstadler, Christian; Motzko, Christoph. Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag 2021.
- Hofstadler, Christian; Dini, Amir; Petschnig, Johannes (2019):** Digitalisierung im Baubetrieb – Einsatz der Photogrammetrie zur 3D-Rekonstruktion. In: Aktuelle Entwicklungen in Baubetrieb, Bauwirtschaft und Bauvertragsrecht. 50 Jahre Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft der TU Graz; S. 805-838. Hrsg.: Hofstadler, Christian. Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag 2019.
- Hofstadler, Christian; Ninaus, Cornelia (2019):** Wissen als grundlegender Produktionsfaktor in der Bauwirtschaft. In: Aktuelle Entwicklungen in Baubetrieb, Bauwirtschaft und Bauvertragsrecht. 50 Jahre Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft der TU Graz; S. 887-907. Hrsg.: Hofstadler, Christian. Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag 2019.
- Hölczi, Andreas (2014):** Technologieunterstützte Anlieferstrategien bei Baumaßnahmen im Bestand – TABB. Schlussbericht, AIF/ IGF-Vorhaben 17167. Bremen, Bundesvereinigung Logistik, Forschungsbericht 2014.
- Höppner, Gerrit; Uhl, Sebastian (2011):** Status-quo der baulogistischen Planung und die Auswirkungen für die Materialversorgung. In: Digitale Baustelle – innovativer Planen, effizienter Ausführen. Werkzeuge und Methoden für das Bauen im 21. Jahrhundert; S. 214-220. Hrsg.: Günthner, Willibald A.; Borrmann, André. Berlin et al.: Springer Verlag 2011.
- Huber, Daniel; Kaiser, Thomas (2017):** Wie das Internet der Dinge neue Geschäftsmodelle ermöglicht. In: Industrie 4.0. Herausforderungen, Konzepte und Praxisbeispiele; S. 17-28. Hrsg.: Reinheimer, Stefan. Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag 2017.
- Hughes, Josie; Yan, Jize; Soga, Kenichi (2015):** Development of wireless sensor network using Bluetooth Low Energy (BLE) for construction noise monitoring. In: INTERNATIONAL

JOURNAL ON SMART SENSING AND INTELLIGENT SYSTEMS VOL. 8; NO. 2; Juni 2015; S. 1379-1405.

Isikgel, Levent (2021): Eine Untersuchung zur Leistungsfähigkeit von Baustellenzufahrten und deren Auswirkung auf die unmittelbare verkehrliche Umgebung. Betreuer: Kleiner, Jonas. Darmstadt, Technische Universität, Institut für Baubetrieb, Masterthesis 2021.

Jahr, Katrin (2019): Über Baustellen Lernen – Wissensgewinn aus Luftbildern. In: Tagungsband 31. Forum Bauinformatik, Berlin, 2019.

https://publications.cms.bgu.tum.de/2019_Jahr_FBI.pdf, Zugriff: 20. April 2023.

Jahr, Katrin; Braun, Alex (2018): Maschinelles Sehen für die automatische Erkennung von Baubehelfen. In: Tagungsband 30. Forum Bauinformatik, Weimar, 2018.

https://publications.cms.bgu.tum.de/2018_Jahr_FBI.pdf, Zugriff: 20. April 2023.

Jünemann, Reinhardt (1989): Materialfluß und Logistik: Systemtechnische Grundlagen mit Praxisbeispielen. Berlin et al.: Springer Verlag 1989.

Kaffenberger, Hannah Marie (2019): Eine Analyse zur Anlieferungsavisierung in der Bauwirtschaft. Betreuer: Kleiner, Jonas. Darmstadt, Technische Universität, Institut für Baubetrieb, Bachelorthesis 2019.

Kagermann, Henning; Wahlster, Wolfgang; Helbig, Johannes (2013): Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Hrsg.: acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V.. München: Eigenverlag 2013.

Kaiser, Jörg (2013): Lean Process Management in der operativen Bauabwicklung. Darmstadt: Eigenverlag 2013. Zugleich: Darmstadt, Technische Universität, Institut für Baubetrieb, Dissertation 2013.

Kamm, Hellwig (1994): Materialwirtschaftliche Steuerung im Baubetrieb. Düsseldorf: VDI Verlag 1994. Zugleich: Darmstadt, Technische Hochschule, Institut für Baubetrieb, Dissertation 1993.

Kaneko, Tomoyo; Hamada, Koji; Kondo, Tetsu (2007): Development of construction logistics system using radio frequency identification. In: 24th International Symposium on Automation & Robotics in Construction (ISRAC 2007). Construction Automation Group, I.I.T Madras; S. 55-62.

Karaali, Cihat (2018): Grundlagen der Steuerungstechnik. Einführung mit Übungen. 3. Auflage – Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag 2018.

Kaya, Salma (2020): Durchführung einer Baustellenstudie zum sensorgestützten Supply-Chain-Management im Bauwesen. Betreuer: Kleiner, Jonas. Darmstadt, Technische Universität, Institut für Baubetrieb, Masterthesis 2020.

Keller, Maximilian (2018): Eine Analyse von Bauhöfen – Erstellung eines Zukunftskonzeptes. Betreuer: Kleiner, Jonas. Darmstadt, Technische Universität, Institut für Baubetrieb, Masterthesis 2018.

Kirsch, Jürgen (2009): Organisation der Bauproduktion nach dem Vorbild industrieller Produktionssysteme. Entwicklung eines Gestaltungsmodells eines Ganzheitlichen Produktionssystems für den Bauunternehmer. Karlsruhe: Universitätsverlag 2009. Zugleich: Karlsruhe,

Universität (TH), Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften, Dissertation 2008.

Klaubert, Cornelia S. (2011): Entwicklung eines RFID-basierten Informations- und Kommunikationssystems für die Baulogistik. München: Eigenverlag 2011. Zugleich: München, Technische Universität, Fakultät für Maschinenwesen, Dissertation 2011.

Klaus, Peter (2002): Die dritte Bedeutung der Logistik. Beiträge zur Evolution logistischen Denkens. Hamburg: Deutscher Verkehrs-Verlag 2002.

Klaus, Peter (2012): Supply Chain Management. In: Gabler Lexikon Logistik. Management logistischer Netzwerke und Flüsse; S. 554-562. Hrsg.: Klaus, Peter; Krieger, Winfried; Krupp, Michael. 5. Auflage – Wiesbaden: Springer Gabler Verlag 2012.

Klug, Florian (2008): Gestaltungsprinzipien einer Schlanken Logistik. In: Zeitschrift für die gesamte Wertschöpfungskette Automobilwirtschaft; S. 56-61.

Klug, Florian (2018): Logistikmanagement in der Automobilindustrie. Grundlagen der Logistik im Automobilbau. 2. Auflage – Berlin: Springer Vieweg Verlag 2018.

Koether, Richard (2014): Distributionslogistik. Effiziente Absicherung der Lieferfähigkeit. 2. Auflage – Wiesbaden: Springer Gabler Verlag 2014.

Kosel, Christopher (2022): Ein Beitrag zur Prozessautomatisierung im Bauprojekt-Controlling. Darmstadt: TUprints 2023. Zugleich: Darmstadt, Technische Universität, Institut für Baubetrieb, Dissertation 2022.

Koskela, Lauri (1992): Application of the new production philosophy to construction. Stanford, University, Center for integrated facility engineering, CIFE Technical Report #72.

Koszyk, Dawid (2019): Eine Untersuchung zu Auswirkungen von Baustellenzufahrten auf die unmittelbare verkehrliche Umgebung. Betreuer: Kleiner, Jonas. Darmstadt, Technische Universität, Institut für Baubetrieb, Masterthesis 2019.

Krafcik, John F. (1988): Triumph of the Lean Production System. In: Sloan Management Review 30; Herbst 1988; S. 41-52.

Krauß, Siri (2005): Die Baulogistik in der schlüsselfertigen Ausführung. Ein Modell für die systematische Entwicklung projekt- und fertigungsspezifischer Logistikprozesse. Berlin: Bauwerk Verlag 2005. Zugleich: Stuttgart, Universität, Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften, Dissertation 2005.

Krauß, Siri (2010): Organisationsmodelle für die Baulogistik in Deutschland. In: Baulogistik – Konzepte für eine bessere Ver- und Entsorgung im Bauwesen; S. 17-28. Hrsg.: Clausen, Uwe. Dortmund: Verlag Praxiswissen 2010.

Krieger, Winfried (2012): Aufbauorganisation. In: Gabler Lexikon Logistik. Management logistischer Netzwerke und Flüsse; S. 14-19. Hrsg.: Klaus, Peter; Krieger, Winfried; Krupp, Michael. 5. Auflage – Wiesbaden: Springer Gabler Verlag 2012.

Krönert, Nils; Zanona, Julia (2021): Automatisierte Bauprozesse durch Robotik. In: Agile Digitalisierung im Baubetrieb – Grundlagen, Innovationen, Disruptionen und Best Practices; S. 447-458. Hrsg.: Hofstadler, Christian; Motzko, Christoph. Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag 2021.

- Kuhn, Axel; Hellingrath, Bernd (2002):** Supply Chain Management. Optimierte Zusammenarbeit in der Wertschöpfungskette. Berlin et al.: Springer Verlag 2002.
- Kulick, Reinhard (1979):** Versorgung von Auslandsbaustellen. In: Bauwirtschaft; 33 Jg.; Heft 48; 29. November 1979; S. 2135-2140.
- Kulick, Reinhard (1981):** Logistische Aufgaben bei der Vorbereitung und Abwicklung von Auslandsbaustellen. In: Bauingenieur; Band 56; 1981; S. 193-198.
- Küppersbusch, Daniel (2020):** Taktsynchrone Materialversorgung der Ausbauphase durch kommissionierte Warenkörbe. Stuttgart: Eigenverlag 2020. Zugleich: Stuttgart, Universität, Institut für Baubetriebslehre, Dissertation 2020.
- Lang, Marius (2020):** Eine Untersuchung zum Baustoffhandel. Betreuer: Kleiner, Jonas. Darmstadt, Technische Universität, Institut für Baubetrieb, Bachelorthesis 2020.
- Lange, Sebastian (2017):** Die Organisation einer flussorientierten Baulogistik für den Ausbau. Stuttgart: Eigenverlag 2017. Zugleich: Stuttgart, Universität, Institut für Baubetriebslehre, Dissertation 2017.
- Lange, Jörg; Kanaack, Ulrich; Feucht, Thilo; Erven, Maren; Borg, Christopher; Waldschmitt, Benedikt (2020):** 3-D gedruckte Fußgängerbrücke aus Stahl. In: Baustatik – Baupraxis 14, Universität Stuttgart; S. 215-222.
- Lange, Sebastian; Tyryshkina, Kristina (2018):** Die modellbasierte Materialbestellung in einem Generalunternehmen – Entwicklung eines teilautomatisierten Bestellprozesses für den Rohbau. In: Bauingenieur; Band 93; November 2018; S. 447-453.
- Large, Rudolf (2016):** Logistikmanagement. Berlin: Walter de Gruyter Verlag 2016.
- Larson, Paul D.; Halldorsson, Arni (2004):** Logistics Versus Supply Chain Management: An International Survey. In: International Journal of Logistics: Research and Applications; Vol. 7; No. 1; März 2004; S. 17-31.
- Leifgen, Christian (2020):** Ein Beitrag zur digitalen Transformation der Lean Construction am Beispiel der BIM-basierten Taktplanung und Taktsteuerung. Düren: Shaker Verlag 2019. Zugleich: Darmstadt, Technische Universität, Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen, Dissertation 2020.
- Lerche, Nina (2021):** Eine Analyse von Warenverteilzentren in der Bauwirtschaft im Kontext der Organisation, der Koordination sowie der Initiatoren und Betreiber. Betreuer: Kleiner, Jonas. Darmstadt, Technische Universität, Institut für Baubetrieb, Masterthesis 2021.
- Linnebacher, Daniela (2019):** Wissensmanagement in der Sichtbetontechnologie. Darmstadt: TUprints 2020. Zugleich: Darmstadt, Technische Universität, Institut für Baubetrieb, Dissertation 2019.
- LoRa Alliance (2015):** LoRaWAN. What is it? A technical overview of LoRa® and LoRaWAN™. Hrsg.: LoRa Alliance. San Ramon: Eigenverlag 2015.
- Losacker, Jannik (2018):** Eine Analyse des Kommissionierungsprozesses beim Betrieb von Warenverteilzentren in der Bauwirtschaft. Betreuer: Kleiner, Jonas. Darmstadt, Technische Universität, Institut für Baubetrieb, Masterthesis 2018.

- Lundesjö, Greger (2011):** Using Construction Consolidation Centres to reduce construction waste and carbon emissions. WRAP / The Logistics Business, Forschungsbericht 2011.
- Lundesjö, Greger (2015):** Consolidation centres in construction logistics. In: Supply Chain Management and Logistics in Construction; S. 225-242. Hrsg.: Lundesjö, Greger. London et al.: Kogan Page 2015.
- Martin, Heinrich (2016):** Transport- und Lagerlogistik. Systematik, Planung, Einsatz und Wirtschaftlichkeit. 10. Auflage – Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag 2018.
- Mehr, Oliver (2012):** Polysensorale Bauprozessidentifikation durch kognitive Systeme. Darmstadt: Eigenverlag 2012. Zugleich: Darmstadt, Technische Universität, Institut für Baubetrieb, Dissertation 2012.
- Meins-Becker, Anica (2011):** Modell zur Unterstützung bauleistungslogistischer Prozesse entlang der Versorgungskette der Bauwirtschaft. Wuppertal: Eigenverlag 2011. Zugleich: Wuppertal, Bergische Universität, LuF Baubetrieb und Bauwirtschaft, Dissertation 2011.
- Mohamed, Kaled Salah (2019):** The Era of Internet of Things. Cham: Springer Verlag 2019.
- Motzko, Christoph (2008):** IT-Simulation und Realität – Eine baubetriebliche Betrachtung. In: IT verändert das Bauen; Heft 13; S. 57-74. Hrsg.: Stiftung Bauwesen. Stuttgart: Eigenverlag 2008.
- Motzko, Christoph (2010):** Digitale Schnittstellen im Bauwesen. In: Digitale Prozesse – Planung, Gestaltung, Fertigung; S. 33-40. Hrsg.: Hauschild, Moritz; Karzel, Rüdiger. München: Detail 2010.
- Motzko, Christoph (2020):** Bauleistungslogistik. In: Bauwirtschaft und Baubetrieb. Technik – Organisation – Wirtschaftlichkeit – Recht; S. 593-600. Hrsg.: Diederichs, Claus Jürgen; Malkwitz, Alexander. 3. Auflage – Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag 2020.
- Motzko, Christoph; Fenner, Jörg; Kleiner, Jonas; Richter, Pia (2019):** Zur Relevanz der Bauleistungslogistikplanung. In: Aktuelle Entwicklungen in Baubetrieb, Bauwirtschaft und Bauvertragsrecht. 50 Jahre Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft der TU Graz; S. 79-93. Hrsg.: Hofstadler, Christian. Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag 2019.
- Motzko, Christoph; Gogic, Sandy; Kleiner, Jonas; Weil, Pia (2021):** Ausgewählte Aspekte des zeitnahen Controllings von Bauprojekten. In: Agile Digitalisierung im Baubetrieb – Grundlagen, Innovationen, Disruptionen und Best Practices; S. 659-674. Hrsg.: Hofstadler, Christian; Motzko, Christoph. Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag 2021.
- Motzko, Christoph; Mehr, Oliver; Klingenberg, Jörg; Binder, Florian (2013):** Grundlagen des Bauprozessmanagements. In: Praxis des Bauprozessmanagements – Termine, Kosten und Qualität zuverlässig steuern; S. 1-35. Hrsg.: Motzko, Christoph. Berlin: Ernst & Sohn Verlag 2013.
- Motzko, Christoph; Pflug, Christoph (2009):** Informationsgewinnung aus Bildern im Baubetrieb. In: Festschrift 1969 - 2009. 40 Jahre Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft; S. 87-94. Hrsg.: Heck, Detlef. Graz: Eigenverlag 2009.
- Muchna, Claus; Brandenburg, Hans; Fottner, Johannes; Gutermuth, Jens (2018):** Grundlagen der Logistik. Begriffe, Strukturen und Prozesse. Wiesbaden: Springer Gabler Verlag 2018.

Müller, Alexander (2020): Eine Untersuchung zur Anlieferungsavisierung in der Bauwirtschaft. Betreuer: Kleiner, Jonas. Darmstadt, Technische Universität, Institut für Baubetrieb, Masterthesis 2020.

Müller-Römer, Frank (2007): Pyramidenbau mit Rampen und Seilwinden – ein Beitrag zur Bautechnik im Alten Reich. München, Ludwig-Maximilians-Universität, Dissertation 2007.

Näther, Matthias; Nerella, Venkatesh Naidu; Krause, Martin; Kunze, Günther; Mechtcherine, Viktor; Schach, Rainer (2017): Beton-3D-Druck – Machbarkeitsuntersuchungen zu kontinuierlichen und schalungsfreien Bauverfahren durch 3D-Formung von Frischbeton. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2017.

Navarro-Correcher, Carolina; Pérez-Cervera, Carles; Sanz-Argent, Josep; Furió-Prunonosa, Salvador (2018): Business models analysis of Construction Consolidation Centres. In: Proceedings of 7th Transport Research Arena TRA 2018, Wien, 2018.

Nichterlein, Yannick (2021): Entwicklung eines digitalen Tools zum Bestellvorgang mit der Methode Building Information Modeling (BIM). Betreuer: Kleiner, Jonas. Darmstadt, Technische Universität, Institut für Baubetrieb, Bachelorthesis 2021.

Nolte, Alexander (2012): Ein Beitrag zur effizienten Steuerung des Einsatzes von Schalungsmietgeräten auf Baustellen. Darmstadt: Eigenverlag 2012. Zugleich: Darmstadt, Technische Universität, Institut für Baubetrieb, Dissertation 2012.

Norrdine, Abdelmoumen (2008): Untersuchung und Entwicklung neuartiger Technologien für die präzise Positionierung und Orientierung innerhalb von Gebäuden. Darmstadt: Eigenverlag 2008. Zugleich: Darmstadt, Technische Universität, Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie, Dissertation 2008.

Norrdine, Abdelmoumen; Motzko, Christoph (2020): An internet of things based transportation cart for smart construction site. In: 2020 International Conferences on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData) and IEEE Congress on Cybermatics (Cybermatics); S. 160-167.

North, Klaus (2021): Wissensorientierte Unternehmensführung. Wissensmanagement im digitalen Wandel. 7. Auflage – Wiesbaden: Springer Gabler Verlag 2021.

Nyhius, Peter (2008): Entwicklungsschritte zu Theorien der Logistik. In: Beiträge zu einer Theorie der Logistik; S. 1-18. Hrsg.: Nyhius, Peter. Berlin et al.: Springer Verlag 2008.

Oeltjenbruns, Henning (2000): Organisation der Produktion nach dem Vorbild Toyotas. Aachen: Shaker Verlag 2000. Zugleich: Clausthal, Technische Universität, Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Maschinenwesen, Dissertation 2000.

Oesterreich, Thuy Duong; Teuteberg, Frank (2017): Industrie 4.0 in der Wertschöpfungskette Bau – Ferne Vision oder greifbare Realität? In: Industrie 4.0. Herausforderungen, Konzepte und Praxisbeispiele; S. 71-90. Hrsg.: Reinheimer, Stefan. Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag 2017.

Ohno, Taiichi (2009): Das Toyota-Produktionssystem. 2. Auflage – Frankfurt am Main: Campus Verlag 2009.

Olivieri, Hylton; Seppänen, Olli; Peltokorpi, Antti (2017): Real-Time Tracking of Production Control: Requirements and Solutions. In: Proceedings Lean & Computing in Construction Congress (LC³), Vol. 1 (CIB W78), Heraklion, 2017; S. 671-678.

https://www.researchgate.net/publication/318455471_Real-Time_Tracking_of_Production_Control_Requirements_and_Solutions, Zugriff: 20. April 2023.

Otto, Jens; Krause, Martin (2017): CONPrint3D@: 3D-Druck als Innovation im Betonbau. In: Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko; S. 571-586. Hrsg.: Fenner, Jörg. Darmstadt: Eigenverlag 2017.

Ottosson, Maria (2005): Evaluation report – New Concepts for the Distribution of Goods (WP 9). Trendsetter Report No 2005:7. Stockholm, TFK – Transport Research Institute, Forschungsbericht 2005.

Papier, Felix; Thonemann, Ulrich (2018): Supply Chain Management. In: Begriff der Logistik, logistische Systeme und Prozesse; S. 29-54. Hrsg.: Tempelmeier, Horst. Berlin: Springer Vieweg Verlag 2018.

Park, JeeWong; Kim, Kyungki; Cho, Yong K. (2016): Framework of Automated Construction-Safety Monitoring Using Cloud-Enabled BIM and BLE Mobile Tracking Sensors. In: Journal of Construction Engineering and Management 05016019.

Pflug, Christoph (2008): Ein Bildinformationssystem zur Unterstützung der Bauprozesssteuerung. Darmstadt: Eigenverlag 2008. Zugleich: Darmstadt, Technische Universität, Institut für Baubetrieb, Dissertation 2008.

Pflug, Christoph (2017): Einsatz von IT-Systemen in der industriellen Praxis. In: Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko; S. 599-608. Hrsg.: Fenner, Jörg. Darmstadt: Eigenverlag 2017.

Pfohl, Hans-Christian (1972): Marketing – Logistik. Gestaltung, Steuerung und Kontrolle des Warenflusses im modernen Markt. Mainz: Distributions-Verlag 1972.

Pfohl, Hans-Christian (2016): Logistikmanagement. Konzeption und Funktionen. 3. Auflage – Berlin et al.: Springer Vieweg Verlag 2016.

Pfohl, Hans-Christian (2018): Logistiksysteme. Betriebswirtschaftliche Grundlagen. 9. Auflage – Berlin: Springer Verlag 2018.

Plowman, Edward Grosvenor (1964): Elements of Business Logistics. Stanford, University, Graduate School of Business, Vorlesungsmanuskript 1964.

Popal, Harun Reschad (2021): Eine Untersuchung zur Lagerhaltung von Baustoffen auf Baustellen in der Ausbauphase. Betreuer: Kleiner, Jonas. Darmstadt, Technische Universität, Institut für Baubetrieb, Masterthesis 2021.

Porsche Consulting (2020): Lean Construction: Schlanke Baulogistik, Präsentationsfolien zur Vorlesung Baubetrieb C2 im Sommersemester 2020 am Institut für Baubetrieb der Technischen Universität Darmstadt.

Pörschmann, Hans; Gleue, Christian (1985): Transport-, Umschlag- und Lagerungsprozesse im Bauwesen. 2. Auflage – Berlin: VEB Verlag für Bauwesen 1985.

Prockl, Günter (2012): Efficient Consumer Response. In: Gabler Lexikon Logistik. Management logistischer Netzwerke und Flüsse; S. 141-146. Hrsg.: Klaus, Peter; Krieger, Winfried; Krupp, Michael. 5. Auflage – Wiesbaden: Springer Gabler Verlag 2012.

Pruckmayr, Stefan (2019): Bauprozess optimieren. In: Aktuelle Entwicklungen in Baubetrieb, Bauwirtschaft und Bauvertragsrecht. 50 Jahre Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft der TU Graz; S. 839-847. Hrsg.: Hofstadler, Christian. Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag 2019.

Quoppa: <https://www.quoppa.com/de/>, Zugriff: 20. April 2023.

Rieser, Andreas (1996): Bauen und Logistik. Eine Untersuchung über Zusammenhänge. Innsbruck, Leopold-Franzens-Universität, Fakultät für Bauingenieurwesen und Architektur, Dissertation 1996.

Roland Berger (2016): Digitalisierung der Bauwirtschaft. Der europäische Weg zur „Construction 4.0“. Hrsg.: Roland Berger GmbH. München: Eigenverlag 2016.

Rosenberger, Andreas (2019): Eine Untersuchung zu Einflussfaktoren auf die Montageleistung beim Fassadenbau. Betreuer: Kleiner, Jonas. Darmstadt, Technische Universität, Institut für Baubetrieb, Masterthesis 2019.

Ruhl, Fabian (2016): Entwicklung eines Baulogistikprozessmodells. Darmstadt: Eigenverlag 2016. Zugleich: Darmstadt, Technische Universität, Institut für Baubetrieb, Dissertation 2016.

Ruhl, Fabian; Motzko, Christoph; Lutz, Peter (2018): Baulogistikplanung – Schnelleinstieg für Bauherren, Architekten und Fachplaner. Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag 2018.

Sanladerer, Stefan (2008): EDV-gestützte Disposition mit Telematikeinsatz und mobiler Datenerfassung in der Baulogistik. München: Eigenverlag 2008. Zugleich: München, Technische Universität, Fakultät für Maschinenwesen, Dissertation 2008.

Sauer, Daniel Christian (2020): Eine Untersuchung zu Warenverteilzentren in der Bauwirtschaft im Kontext der Organisation sowie der Initiatoren und Betreiber. Betreuer: Kleiner, Jonas. Darmstadt, Technische Universität, Institut für Baubetrieb, Masterthesis 2020.

Schach, Rainer; Schubert, Nadine (2009): Logistik im Bauwesen. In: Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden; 58 Jg.; Heft 1-2; S. 59-63. Hrsg.: Technischen Universität Dresden. Dresden: Eigenverlag 2009.

Schmidt, Norbert (2003): Wettbewerbsfaktor Baulogistik. Neue Wertschöpfungspotenziale in der Baustoffversorgung. Hamburg: Deutscher Verkehrs-Verlag 2003.

Schneider, Markus (2016): Lean Factory Design. Gestaltungsprinzipien für die perfekte Produktion und Logistik. München: Carl Hanser Verlag 2016.

Schuh, Günther; Hering, Niklas; Brunner, André (2013): Einführung in das Logistikmanagement. In: Logistikmanagement; S. 1-34. Hrsg.: Schuh, Günther; Stich, Volker. 2. Auflage – Berlin et al.: Springer Vieweg Verlag 2013.

Schuh, Günther; Stich, Volker; Helmig, Jan (2013): Konzepte des Supply-Chain-Managements. In: Logistikmanagement; S. 209-256. Hrsg.: Schuh, Günther; Stich, Volker. 2. Auflage – Berlin et al.: Springer Vieweg Verlag 2013.

- Schuh, Günther; Stich, Volker; Kompa, Stefan (2013):** Distributionslogistik. In: Logistikmanagement; S. 115-164. Hrsg.: Schuh, Günther; Stich, Volker. 2. Auflage – Berlin et al.: Springer Vieweg Verlag 2013.
- Schulte, Christof (2009):** Logistik. Wege zur Optimierung der Supply Chain. 5. Auflage – München: Vahlen Verlag 2009.
- Schulte-Zurhausen, Manfred (2014):** Organisation. 6. Auflage – München: Vahlen Verlag 2014.
- Schwenzer, Tim (2019):** Ermittlung von Verbesserungspotentialen in den Prozessen und in den Prozessstrukturen des Bauhofes einer Bauunternehmung. Betreuer: Kleiner, Jonas. Darmstadt, Technische Universität, Institut für Baubetrieb, Masterthesis 2019.
- Seeling, Reinhard (1982):** Denken Sie log(ist)isch. In: Baumarkt 7/1982; S. 354-355.
- Seeling, Reinhard (1992):** Logistik in der Bauunternehmung. In: Baumarkt 5/1992; S. 404-408.
- Seemann, York Frederik (2007):** Logistikkoordination als Organisationseinheit bei der Bauausführung. Aachen: Wissenschaftsverlag Mainz 2007. Zugleich: Duisburg-Essen, Universität, Fachgebiet Baubetrieb und Bauwirtschaft, Dissertation 2007.
- Siepmann, David; Graef, Norbert (2016):** Industrie 4.0 – Grundlagen und Gesamtzusammenhang. In: Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0; S. 17-82. Hrsg.: Roth, Armin. Berlin et al.: Springer Gabler Verlag 2016.
- Silbe, Katja (2017):** Modellbasierte Kalkulation. In: Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko; S. 741-760. Hrsg.: Fenner, Jörg. Darmstadt: Eigenverlag 2017.
- Sommer, Hans (2016):** Projektmanagement im Hochbau. Mit BIM und Lean Management. 4. Auflage – Berlin et al.: Springer Vieweg Verlag 2016.
- Sorge, Sandy (2018):** Eine Untersuchung zu den Systemen der Geräteverwaltung auf Baustellen des Hochbaus. Betreuer: Kleiner, Jonas. Darmstadt, Technische Universität, Institut für Baubetrieb, Bachelorthesis 2018.
- Spengler, Arnim; Peter, Jacqueline (2020):** Die Methode Building Information Modeling. Schnelleinstieg für Architekten und Bauingenieure. Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag 2020.
- Stöckl, Ralph Jakob (2022):** Einsatzpotenzial neuronaler Netze im Baubetrieb und in der Bauwirtschaft – Von der automatischen Datenerfassung bis hin zur Tätigkeitsklassifikation anhand erhobener Bewegungsmuster. Graz: Eigenverlag 2022. Zugleich: Graz, Technische Universität, Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft, Dissertation 2022.
- SUCCESS (2017):** Business models for construction logistics optimisation and CCC introduction. Luxemburg, Institute of Science and Technology, Forschungsbericht 2017.
- SUCCESS (2018):** Final validation report for each site and long-term sites implementation plan. Luxemburg, Institute of Science and Technology, Forschungsbericht 2017.
- Sullivan, Gary; Barthorpe, Stephen; Robbins, Stephen (2010):** Managing construction logistics. Oxford et al.: Blackwell 2010.

- Teizer, Jochen; Golovina, Olga; König, Markus; Melzner, Jürgen; Wolf, Mario (2017):** Automatisierte 4D-Bauablaufvisualisierung und Ist-Datenerfassung zur Planung und Steuerung von Bauprozessen. In: Bauingenieur. Jahresausgabe VDI-Bautechnik 2017/2018; S. 129-135. Hrsg.: VDI-Fachbereich Bautechnik. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag 2017.
- Teizer, Jochen; Wolf, Mario; Golovina, Olga; Perschewski, Manuel; Propach, Markus; Neges; Matthias; König, Markus (2017):** Internet of Things (IoT) for Integrating Environmental and Localization Data in Building Information Modeling (BIM). In: 34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2017).
- ten Hompel, Michael; Schmidt, Thorsten (2010):** Warehouse Management. Organisation und Steuerung von Lager- und Kommissioniersystemen. 4. Auflage – Berlin et al.: Springer Verlag 2010.
- Tränkler, Hans-Rolf; Reindl, Leonhard M. (2018):** Sensortechnik. Handbuch für Praxis und Wissenschaft. 2. Auflage – Berlin et al.: Springer Vieweg Verlag 2018.
- Transport for London (2008):** London Construction Consolidation Centre – Final Report. https://www.ndslogistik.se/files/reports/1425975813_9.pdf, Zugriff: 20. April 2023.
- Transport for London (2016):** The Directory of London Construction Consolidation Centres. https://www.clocs.org.uk/casestudies/The-Directory-of-London-Construction-Consolidation-Centres-v12_FINAL_WEB-ea550c.pdf, Zugriff: 20. April 2023.
- Tröll, Caroline (2021):** Durchführung einer Baustellenstudie zum sensorgestützten Supply-Chain-Management bei Fertigteilstützen aus der Sicht des Produzenten. Betreuer: Kleiner, Jonas. Darmstadt, Technische Universität, Institut für Baubetrieb, Masterthesis 2021.
- Ulrich, Peter; Hill, Wilhelm (1979):** Wissenschaftstheoretische Aspekte ausgewählter betriebswissenschaftlicher Konzeptionen. In: Wissenschaftstheoretische Grundfragen der Wirtschaftswissenschaften; S.161-190. Hrsg.: Raffée, Hans; Abel, Bodo. München: Vahlen Verlag 1979.
- VDI 2553:2019-03:** Lean Construction. Hrsg.: Verein Deutscher Ingenieure. März 2019.
- Velagic, Nadina (2022):** Eine Analyse zu den Bestell- und Lieferprozessen von Baustoffen in der Bauwirtschaft aus Sicht des Baustoffhandels. Betreuer: Kleiner, Jonas. Darmstadt, Technische Universität, Institut für Baubetrieb, Masterthesis 2022.
- Voigtmann, Julia Katharina (2014):** Simulation bauleistungsprozesse im Ausbau. Weimar: Eigenverlag 2014. Zugleich: Weimar, Bauhaus-Universität, Institut für Baubetrieb und Bauverfahren, Dissertation 2014.
- Voigtmann, Julia Katharina; Bärngstädt, Hans-Joachim (2010):** Simulationsgestütztes Supply Network Management auf Baustellen. In: Supply Chain Network Management. Gestaltungskonzepte und Stand der praktischen Anwendung; S. 167-186. Hrsg.: Engelhardt-Nowitzki, Corinna; Nowitzki, Olaf; Zsifkovits, Helmut. Wiesbaden: Springer Gabler Verlag 2010.
- von Both, Petra; Koch, Volker; Kindsvater, Andreas (2012):** BIM – Potentiale, Hemmnisse und Handlungsplan. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2012.

- Vrijhoef, Ruben (2018):** Improving efficiency and environmental impact applying JIT logistics and transport consolidation in urban construction projects. In: Proceedings of the Creative Construction Conference, Ljubljana, Juli 2018; S. 552-559.
- Vrijhoef, Ruben; Koskela, Lauri (2000):** The four roles of supply chain management in construction. In: European Journal of Purchasing & Supply Management; Heft 6 (2000); S. 169-178.
- Wagner, Thomas (2002):** City-Logistik als Teil der Supply-Chain. Entwicklung einer Konzeption vor dem Hintergrund infrastruktureller Veränderungen. Sternenfels: Verlag Wissenschaft & Praxis 2002. Zugleich: Oestrich-Winkel, European Business School, Dissertation 2001.
- Wannenwetsch, Helmut (2014):** Integrierte Materialwirtschaft, Logistik und Beschaffung. 5. Auflage – Berlin et al.: Springer Vieweg Verlag 2014.
- Weber, Jörg (2007):** Simulation von Logistikprozessen auf Baustellen auf Basis von 3D-CAD Daten. Dortmund: Eigenverlag 2007. Zugleich Dortmund, Universität, Fakultät Maschinenbau, Dissertation 2007.
- Weber, Jürgen (2008):** Überlegungen zu einer theoretischen Fundierung der Logistik in der Betriebswirtschaftslehre. In: Beiträge zu einer Theorie der Logistik; S. 43-65. Hrsg.: Nyhius, Peter. Berlin et al.: Springer Verlag 2008.
- Weil, Pia Bernadette (2021):** Ein Beitrag zur Anwendung der Lean Construction im schlüsselfertigen Hochbau. Darmstadt: TUprints 2022. Zugleich: Darmstadt, Technische Universität, Institut für Baubetrieb, Dissertation 2021.
- Werner, Hartmut (2017):** Supply Chain Management. Grundlagen, Strategien, Instrumente und Controlling. 6. Auflage – Wiesbaden: Springer Gabler Verlag 2017.
- Wildemann, Horst (2008):** Entwicklungspfade der Logistik. In: Das Beste der Logistik. Innovationen, Strategien, Umsetzungen; S. 161-172. Hrsg.: Baumgarten, Helmut. Berlin et al.: Springer Verlag 2008.
- Womack, James P.; Jones, Daniel T. (2013):** Lean Thinking – Ballast abwerfen, Unternehmensgewinne steigern. 3. Auflage – Frankfurt am Main: Campus Verlag 2013.
- World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development (2004):** The Greenhouse Gas Protocol – A Corporate Accounting and Reporting Standard. Hrsg.: World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development. USA: Eigenverlag 2004.
- Zellner, Justus Maximilian (2022):** Eine Studie zur Integration des Systems Warenverteilzentrum in ein bestehendes Baulogistikprozessmodell. Betreuer: Kleiner, Jonas. Darmstadt, Technische Universität, Institut für Baubetrieb, Masterthesis 2022.
- Zerhoudi, Ouissam (2020):** Eine Untersuchung zum Bestell- und Lieferprozess von Baustoffen in der Bauwirtschaft aus Sicht des Baustoffhandels. Betreuer: Kleiner, Jonas. Darmstadt, Technische Universität, Institut für Baubetrieb, Masterthesis 2020.
- Zhao, Jianyu; Olivieri, Hylton; Seppänen, Olli; Peltokorpi, Antti; Badihi, Behnam; Lundström, Pontus (2017):** Data Analysis on Applying Real Time Tracking in Production Control of Construction.

https://www.researchgate.net/publication/323149760_Data_analysis_on_applying_real_time_tracking_in_production_control_of_construction, Zugriff: 20. April 2023.

Zhao, Jianyu; Seppänen, Olli; Peltokorpi, Antti; Badihi, Behnam; Olivieri, Hylton (2019): Real-time resource tracking for analyzing value-adding time in construction.

https://www.researchgate.net/publication/334838690_Real-time_resource_tracking_for_analyzing_value-adding_time_in_construction, Zugriff: 20. April 2023.

Zimmermann, Josef; Haas, Bernd (2009): Baulegistik: Motivation – Definition – Konzeptentwicklung. In: Tiefbau; Heft 1 (2009); S. 11-16.

Dissertationen des Instituts für Baubetrieb der Technischen Universität Darmstadt

Jahr	Verfasser	Referent und Korreferent	Titel der Dissertation
2023	Jonas Kleiner	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Christian Hofstadler	Ein Beitrag zur Entwicklung von Baustellenversorgungssystemen
2022	Christopher Kosel	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Christian Hofstadler	Ein Beitrag zur Prozessautomatisierung im Bauprojekt-Controlling
2022	Ashleika Adelea	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Christian Hofstadler	A Work Process Analysis for Facility Management Standards in Upstream Oil and Gas Sector of Republic of Indonesia
2021	Pia Bernadette Weil	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Christian Hofstadler	Ein Beitrag zur Anwendung der Lean Construction im schlüsselfertigen Hochbau
2021	Jan Schumann	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Christian Hofstadler	Wechselwirkungen von Baulogistik und Bauproduktion im Fassadenbau
2021	Daniel Lukas Blesinger	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Christian Hofstadler	Ein Beitrag zur Prozessverbesserung bei Abbruch- und Beräumungsarbeiten
2021	Nathalie Raynaud-Duprosper	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Linke	Entwicklung einer Entscheidungshilfe für PPP-Pflegeheimprojekte in Deutschland und Frankreich
2019	Daniela Linnebacher	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Christian Hofstadler	Wissensmanagement in der Sichtbetontechnologie
2018	Hannes Schwarzwälder	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Christian Glock	Ein Organisationsmodell zur Steuerung und Regelung der Digitalisierung von Unternehmen in der Bauwirtschaft
2018	Xiufeng Xue	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Xing Gao	Knowledge an BIM based Construction Safety Management for Assembly Processes
2016	Martin Westerkamp	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Johann-Dietrich Wörner	Ein Beitrag zur Professionalisierung des Managements von Verbundforschungsprojekten
2016	Daniel Schmitz	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Christian Hofstadler	Ein Beitrag zur Integration von Weiterbildung in das Arbeitssystem der Bauleitung eines Bauunternehmens
2016	Stefan Kaiser	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Christian Hofstadler	Soll-Ist-Vergleich von Arbeitssystemen im Stahlbetonbau als Beitrag für den Sicherheits- und Gesundheitsschutz

Jahr	Verfasser	Referent und Korreferent	Titel der Dissertation
2016	Fabian Ruhl	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Detlef Heck	Entwicklung eines Baulogistikprozessmodells
2016	Jan Wöltjen	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Christian Hofstadler	Ein Beitrag zur ökologischen Bewertung von Abbruchverfahren im Hochbau
2016	Henrik Lorenz	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Wolfdietrich Kalusche	Entscheidungshilfe für altersgerechte Immobilienlösungen für Kommunen
2014	Rigbert Fischer	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Christian Hofstadler	Eine Untersuchung zur roboterbasierten Baugruppenfertigung im Stahlbau
2014	Lars Scheidecker	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Christian Hofstadler	Ein Referenzmodell für das Real Estate Investment Management
2014	Christian Vieth	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Die baubetrieblichen Auswirkungen des Anordnungsrechtes des Auftraggebers bei Abschluss und Abwicklung von Bauverträgen
2014	Florian Binder	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Christian Hofstadler	Ereignisbasierte Steuerung baulogistischer Prozesse mit Echtzeit-Ortungssystemen
2013	Michael Löhr	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Planung bei Abbrucharbeiten
2013	Jörg Dohrenbusch	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Peter Racky	Bewertung der Vergabep Praxis bei komplexen Großprojekten im deutschen Verkehrsinfrastrukturbau
2013	Jörg Kaiser	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Rainard Osebold	Lean Process Management in der operativen Bauabwicklung
2013	Erik Boska	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Christian Hofstadler	Gestaltung von Arbeitssystemen in der Sichtbetontechnik
2013	Sandra Sondermann	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko	Prozessorientierter Nachweis von Produktivitätsverlusten auf Baustellen
2013	Svetlana Kometova	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Linke	Controlling langfristiger Projekte im kommunalen Immobilienmanagement – Eine multi-kategoriale Gestaltungsanalyse und Konzeption
2012	Alexander Nolte	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Volkhard Franz	Ein Beitrag zur effizienten Steuerung des Einsatzes von Schalungsmietgeräten auf Baustellen
2012	Julia Schömbs	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Ludger Lohaus	Zu den Einflussgrößen auf das Erscheinungsbild und zu den Kosten von Sichtbeton

Jahr	Verfasser	Referent und Korreferent	Titel der Dissertation
2011	Leif Pallmer	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht	Ein Prozessmodell zur Qualitätsverbesserung der Brandschutzplanung einer Immobilie
2011	Oliver Mehr	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Volkhard Franz Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schwarz	Polysensorale Bauprozessidentifikation durch kognitive Systeme
2011	Ulrich Dölzig	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Risikoallokation bei Parkgaragen im Rahmen von Public Private Partnership
2010	Jan Philipp Koch	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Rainer Wanninger	Integrale Planungsprozesse – Generalistische Handlungsstrategien für komplexe Problemlösungsprozesse in den Zeiten des Klimawandels
2010	Matthias Bergmann	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schwarz	Ergonomiegestützte Multiagenten-Simulation von Montageprozessen im Baubetrieb
2010	Ingo Giesa	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Rainer Wanninger	Prozessmodell für die frühen Bauprojektphasen
2009	Nils Hinrichs	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Linke	Strategien der öffentlichen Hand – Ein kompetenzorientierter Ansatz aus Sicht des Immobiliencontrollings
2009	Carola Maffini	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Konfliktbehandlung in Bauprojektorganisationen
2009	Markus Demmler	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Detlef Heck	Risikomanagement im internationalen Tunnelbau unter Anwendung der Vertragsform FIDIC Red Book
2008	Christoph Pflug	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. habil. Harald Schlemmer	Ein Bildinformationssystem zur Unterstützung der Bauprozesssteuerung
2008	Jens Elsebach	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Bauwerksinformationsmodelle mit vollsphärischen Fotografien – Ein Konzept zur visuellen Langzeitarchivierung von Bauwerksinformationen
2007	Falk Huppenbauer	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Nachunternehmermanagement: Die Entwicklung eines prozessorientierten Entscheidungsmodells für die Beschaffung und das Controlling
2007	Ali Akbar Elahwiesy	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Multiprojektmanagement für Infrastruktur-Bauprojekte
2007	Torsten Fetzner	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Ein Verfahren zur Erfassung von Minderleistungen aufgrund witterungsbedingter Bauablaufstörungen
2007	Christopher Cichos	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Untersuchungen zum zeitlichen Aufwand der Baustellenleitung

Jahr	Verfasser	Referent und Korreferent	Titel der Dissertation
2007	Jörg Klingenberg	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Detlef Heck	Ein Beitrag zur systematischen Instandhaltung von Gebäuden
2006	Julia Schultheis	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Public Private Partnership bei Stadthallen – Rahmenbedingungen und Gestaltungsmöglichkeiten in Deutschland
2006	Helmuth Duve	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Entscheidungshilfe zur Auswahl eines geeigneten Streitregulierungsverfahrens für das Bauwesen unter besonderer Berücksichtigung baubetrieblicher Aspekte
2006	Markus Stürmer	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Beitrag zum Qualitätsmanagement im vorbeugenden baulichen Brandschutz – Untersuchung von ausgewählten Brandschutzmängeln der Ausführungsphase
2005	Ingo Goldenberg	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Optimierung von Supply Chain Prozessen in der Bauwirtschaft durch mobile Technologien und Applikationen
2005	Jörg Huth	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Baubetriebliche Analyse von selbstverdichtendem Beton
2005	Joachim Ruß	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Ausführungsdauern und Kapazitätsplanung von Bauleistungen im Organisierten Selbstbau
2004	Karl Bangert	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko	Untersuchungen zum Einsatz von mit Seilen geführten Lastballon-Kransystemen (LTA Kran-Systeme) im Bauwesen
2004	Detlef Heck	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko	Entscheidungshilfe zur Anwendung von Managementsystemen in Bauunternehmen
2004	Shervin Haghsheno	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Analyse der Chancen und Risiken des GMP-Vertrags bei der Abwicklung von Bauprojekten
2004	Carsten Toppel	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner	Technische und ökonomische Bewertungen verschiedener Abbruchverfahren im Industriebau
2002	Alexander Glock	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko	Technisch-wirtschaftliche Untersuchung luftschiffbasierter Schwerlastlogistik im Bauwesen
2002	Patrick Büttner	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko	Abbruch von Stahlbeton und Mauerwerksbauten – Entwicklung einer Entscheidungshilfe zur Auswahl von Hydraulikbaggern
2002	Marc Heim	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Die zeitnahe Leistungsfeststellung von Baustellen unter besonderer Berücksichtigung von Bildinformationssystemen

Jahr	Verfasser	Referent und Korreferent	Titel der Dissertation
2002	Torsten Ebner	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Bauen im Bestand bei Bürogebäuden
2001	Markus Werner	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Einsatzdisposition von Baustellenführungs- kräften in Bauunternehmen
2001	Theresa Pokker	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko	Kalkulation von Erdarbeiten in kontaminier- ten Bereichen
2001	Frank Müller	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Marktstrategische Fremdvergabe unter Be- rücksichtigung entscheidungsrelevanter Ein- flusskriterien
2001	Alexander Bubenik	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Die Fassade und ihr Einfluss auf die schlüs- selfertige Bauausführung
2000	Dirk Mayer	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Entscheidungshilfe für die Beurteilung von Fußbodensystemen im Hochbau
2000	Bernhard Griebel	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Gerhard Girmscheid	Der zeitnahe Soll-Ist-Vergleich aus Sicht der Baustelle
1999	Patrik Loschert	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko	Terminmanagement im schlüssel-fertigen Hochbau
1999	Heinrich Wengerter	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko	Rationalisierungsmöglichkeiten im Mauer- werksbau durch eine robotergestützte Wandvorfertigungsanlage
1999	Katja Silbe	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko	Wirtschaftlichkeit kontrollierter Rückbauar- beiten
1997	Peter Racky	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko	Entwicklung einer Entscheidungshilfe zur Festlegung der Vergabeform
1997	Achim Hitzel	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko	Ein Entscheidungsunterstützungssystem für das Instandhaltungsmanagement der Bun- desfernstraßenbrücken
1996	Carsten Dorn	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr. jur. Klaus Vygen	Systematisierte Aufbereitung von Dokumen- tationstechniken zur Steuerung von Bau- abläufen und zum Nachweis von Bauablauf- störungen
1995	Friedo Mosler	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. e.h. Gert König	Wirtschaftliche Instandhaltung von Betonau- ßenbauteilen
1995	Hermann Kraft	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. e.h. Gert König	Steuerung und Entwicklung von Brückener- haltungsmaßnahmen
1995	Egbert Keßler	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Thomas Bock	Rationalisierung im Schalungsbau durch Einsatz von Robotern

Jahr	Verfasser	Referent und Korreferent	Titel der Dissertation
1994	Boming Zhao	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Volker Kuhne	Ein Verfahren zur Entwicklung eines wissensbasierten Planungssystems für die Terminplanung von Rohbauprojekten im Hochbau
1994	Stefan Plaum	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Lühr	Umweltrelevante organisatorische Anforderungen an Betriebe der Bauwirtschaft – Lösungsmöglichkeiten, aufgezeigt am Beispiel der Baurestmassenbehandlung
1993	Hellwig Kamm	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Reinhard Seeling	Materialwirtschaftliche Steuerung im Baubetrieb, Analyse und Verbesserung baubetrieblicher Beschaffungsvorgänge
1991	Michael Hölzgen	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. e.h. Gert König	Erhaltungskosten von Brücken
1991	Henning Hager	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Claus Jürgen Diederichs	Untersuchung von Einflussgrößen und Kostenänderungen bei Beschleunigungsmaßnahmen von Bauvorhaben
1990	Dirk Reister	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr. rer. pol. Karl Robl	Entwicklung eines Verfahrens zur projektübergreifenden Personaleinsatzoptimierung
1989	Lothar Ruf	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dipl.-Ing. Hansjakob Führer	Integrierte Kostenplanung von Hochbauten
1989	Christoph Motzko	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dipl.-Ing. Klaus Simons	Ein Verfahren zur ganzheitlichen Erfassung und rechnergestützten Einsatzplanung moderner Schalungssysteme
1989	Lothar Forkert	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. e.h. Gert König	Verfahren zur Prognose von Schadensentwicklungen bei einer kostenoptimierten Brückeninstandhaltung
1989	Gerd Bergweiler	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Eberhard Petzschmann	Strukturmodell zur Darstellung und Regeneration von Kalkulationsdaten
1988	Karl Rose	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. e.h. Gert König	Kosten der Erhaltung von Brückenbauwerken
1987	Andreas Lang	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Hans-Gustav Olshausen	Ein Verfahren zur Bewertung von Bauablaufstörungen und Projektsteuerung
1986	Lothar Krampert	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. e.h. Gert König	Der Einfluss von Arbeitseinsatz und Arbeitstakt auf die Kosten von Hochbauten in Ortbeton
1985	Herrmann Keßler	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Wolfram Keil	Der Plan Soll-Ist-Vergleich mit einem Nachweis zeitvariabler Kostenänderung bei einer Bauzeitverschiebung