

Simulationsgestützte Digitale Zwillinge in der Baulegistik

Anne Fischer

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering and Design der Technischen Universität München zur Erlangung einer

Doktorin der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Birgit Vogel-Heuser

Prüfende der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner
2. Prof. Dr.-Ing. Konrad Nübel
3. Prof. Dr.-Ing. Dominik Matt

Die Dissertation wurde am 30.04.2025 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die TUM School of Engineering and Design am 23.07.2025 angenommen.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik an der Technischen Universität München entstanden. Die Basis bildete die Bearbeitung der Forschungsprojekte Bauen 4.0, gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung und betreut vom Projektträger Karlsruhe, sowie MiProcess2Twin, gefördert vom Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie und betreut vom VDI/VDE Innovation + Technik GmbH.

Mein herzlicher Dank gilt meinem Doktorvater und Leiter des Lehrstuhls, Herrn Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner. Seine großzügige Art ermöglichte mir die freie wissenschaftliche und vor allem auch persönliche Entfaltung. Ich wünsche mir sehr, dass die Zusammenarbeit noch lange andauert. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Konrad Nübel und Herrn Prof. Dr.-Ing. Dominik Matt möchte ich mich ebenfalls für die gute Zusammenarbeit, das Interesse an meiner Arbeit sowie die Bereitschaft zur Begutachtung als Zweit- und Drittprüfer bedanken. Frau Prof. Dr.-Ing. Birgit Vogel-Heuser danke ich für die Übernahme des Vorsitzes meiner Prüfungskommission.

Ganz besonders möchte ich mich bei Herrn Akademischem Direktor Stephan Kessler bedanken. Sein technisches Verständnis, sein schier unerschöpfliches Wissen und seine Neugier haben mich immer wieder inspiriert. Seine Großherzigkeit werde ich nicht vergessen.

Des Weiteren möchte ich auch Frau Prof. Dr.-Ing. Iris D. Tommelein danken. Sie ermöglichte mir einen unvergesslichen Forschungsaufenthalt an der UC Berkeley in Kalifornien. Ihre systematische Denkweise und die Fähigkeit, komplexe Zusammenhänge auf einfache Weise zu erklären, sind immer wieder verblüffend.

Vielen Dank an das gesamte Kollegium und das Bauen 4.0-Team mit Zhen Cai und Maximilian Schöberl. Ohne euch alle wäre das Promotionsstudium nicht annähernd so schön gewesen. Ein besonderer Dank gilt dabei meinem ehemaligen Teamleiter und späteren Mentor Felix Top. Außerdem möchte ich mich bei allen Studierenden bedanken, die mich im Rahmen ihrer Studienarbeiten oder ihrer hilfswissenschaftlichen Tätigkeiten maßgeblich unterstützt haben.

Danke an meine Freunde und meine Familie für die unermüdliche Geduld.

München, im September 2025

Anne Fischer

Simulationsgestützte Digitale Zwillinge in der Baulogistik

Die Digitalisierung der Bauindustrie birgt ein großes Potenzial zur Produktivitätssteigerung von Bauprozessen. Bauspezifische Randbedingungen erschweren die Einführung digitaler Technologien im Sinne von Industrie 4.0.

Ein Lösungsansatz zur virtuellen Optimierung von Bauprozessen ist die ereignisorientierte Simulation. In der stationären Industrie wird diese Art der Simulation bereits in der Planung, Realisierung und Umsetzung von Produktions- und Logistiksystemen eingesetzt. Durch die Einbindung von Daten während der Planungs- und Ausführungsphase kann die Simulation aktualisiert werden. Simulationsstudien ermöglichen so die quantitative Entscheidungsunterstützung.

Die Nutzung von Daten in der Simulation erfordert weitere Technologien, wie zum Beispiel zur Sammlung, Aufbereitung und Übertragung von Daten. Diese Kombination aus verschiedenen Technologien und deren Methoden wird, im Sinne von Industrie 4.0, als Digitaler Zwilling bezeichnet.

Die vorliegende Arbeit diskutiert die Hintergründe und den aktuellen Stand der Anwendung von ereignisorientierter Simulation als Digitaler Zwilling für die Baulogistik. Um sowohl ihre Entwicklung als auch ihre Integration in die Baupraxis zu unterstützen, wird ein neues Vorgehensmodell vorgestellt. Es besteht aus vier Bausteinen: (1) Datensammlung, (2) Datenaufbereitung, (3) Datenübertragung und (4) Datennutzung. Ziel ist die Optimierung des Bauproduktionssystems mit Fokus auf den Einfluss der Baulogistik.

Um die Interdisziplinarität der Baulogistik zu bedienen, werden die Bausteine anhand von drei unterschiedlichen Anwendungsbeispielen aus dem Modulbau, dem Hochbau und dem Spezialtiefbau umgesetzt und bewertet. Neben der Simulation kommen in den Anwendungsbeispielen verschiedene digitale Technologien zum Einsatz: Daten werden als Zeitstempel aus Tracking und Tracing Systemen oder als Zeitreihen von Sensordaten von Baugeräten gesammelt, mit Modellen des Maschinellen Lernens aufbereitet und über eine Middleware in die Simulation übertragen.

Insgesamt können so drei Evolutionsstufen mit aufsteigendem Grad an Informationsdichte, Autonomie und Konnektivität abgedeckt werden. Die Anwendung und Diskussion des Vorgehensmodells zeigt die Effekte und die Potenziale von simulationsgestützten Digitalen Zwillingen in der Baulogistik durch eine gleichzeitige Betrachtung von Technologie- und Systemverständnis auf.

Abstract

Simulation-based Digital Twins in Construction Logistics

The digitalization of the construction industry holds great potential for increasing the productivity of construction processes. However, construction-specific constraints make introducing digital technologies in Industry 4.0 challenging.

One approach to the virtual optimization of construction processes is discrete-event simulation. In the stationary industry, this type of simulation is already used in planning, realizing, and implementing production and logistics systems. It is possible to update the simulation by integrating data during the planning and operation. Simulation studies thus enable quantitative decision support.

Using data in simulation requires additional technologies, such as collecting, preparing, and transferring data. This combination of different technologies and their methods is referred to as a digital twin in the context of Industry 4.0.

The dissertation discusses the background and current status of the application of discrete-event simulation as a digital twin for construction logistics. A new process model is presented to support its development and integration into construction practice. It consists of four elements: (1) data collection, (2) data preparation, (3) data transfer, and (4) data utilization. The aim is to optimize the construction production system, focusing on the influence of construction logistics.

The interdisciplinarity of construction logistics is addressed by implementing and evaluating the elements of the new process model using three use cases in the fields of modular housing, high-rise buildings, and deep foundations. In addition to simulation, various digital technologies are used in the application examples: data is collected as time stamps from tracking and tracing systems or as time series from sensor data of construction equipment, processed using machine learning models, and transferred to the simulation via middleware.

The use cases cover three evolutionary stages with increasing information density, autonomy, and connectivity levels. The application and discussion of the new process model highlight the effects and potential of simulation-based digital twins in construction logistics by simultaneously considering technology and system understanding.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	I
Kurzfassung	III
Abstract	V
Inhaltsverzeichnis	XI
Abkürzungsverzeichnis	XIII
Formelzeichenverzeichnis	XVII
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation und Motivation	1
1.2 Herausforderungen bei der Adaption von Industrie 4.0	3
1.3 Problemstellung beim Einsatz von Simulation	4
1.4 Forschungsfragen	6
1.5 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit	8
2 Grundlagen von Digitalen Zwillingen in der Bauindustrie	11
2.1 Systemdefinition und -abgrenzung	11
2.1.1 Charakteristik der Bauindustrie	11
2.1.2 Charakteristik der Baulogistik	12
2.1.3 Charakteristik von Bauprozessen	14
2.2 Gestaltung von Digitalen Zwillingen	21
2.2.1 Begriffe und Definitionen	21
2.2.2 Übertragung auf die Bauindustrie	25
2.2.3 Eingesetzte digitale Technologien	26
3 Aktueller Stand zu simulationsgestützten Digitalen Zwillingen in der Baulogistik	39
3.1 Ereignisorientierte Simulation	39
3.1.1 Methoden	39
3.1.2 Modellierungskonzepte und ihre Werkzeuge	41

3.2	Simulation als Digitaler Zwilling in der Baulogistik	43
3.2.1	Einordnung	43
3.2.2	Bisherige Vorgehensmodelle	45
3.2.3	Anwendungsbereiche	48
3.3	Forschungsbedarf	59
3.3.1	Herausforderungen von simulationsgestützten Digitalen Zwillingen in der Baulogistik	59
3.3.2	Detaillierung der Forschungsfragen	62
4	Lösungsansatz – Vorgehensmodell für simulationsgestützte Digitale Zwillinge in der Baulogistik	65
4.1	Anforderungen an das Vorgehensmodell	65
4.2	Ableitung des Vorgehensmodells	66
4.3	Auswahl der Anwendungsbeispiele	74
5	Anwendungsbeispiel 1: Produktionsanlage im Modulbau	77
5.1	Einleitung	77
5.2	Modellierung	78
5.2.1	Überblick	78
5.2.2	Bauaufgabe	79
5.2.3	Prozesse und Ressourcen	80
5.2.4	Einflussgrößen	83
5.2.5	Eingangsdaten	85
5.3	Implementierung	86
5.3.1	Überblick	86
5.3.2	Simulationsarchitektur	86
5.3.3	Simulationslayout	87
5.3.4	Simulationslogik	88
5.3.5	Verifikation und Validierung	89
5.4	Datensammlung	93

5.5	Experimente	96
5.5.1	Übersicht	96
5.5.2	Experiment 1: Auslastung der Betonierstation	97
5.5.3	Experiment 2: Anzahl an Ressourcen in der Rohbaulinie	99
5.5.4	Experiment 3: Bearbeitungszeit der Doppelwand	100
5.6	Diskussion	101
6	Anwendungsbeispiel 2: Innenausbau im Hochbau	103
6.1	Einleitung	103
6.2	Modellierung	105
6.2.1	Überblick	105
6.2.2	Baufaufgabe	105
6.2.3	Prozesse und Ressourcen	105
6.2.4	Einflussgrößen	109
6.2.5	Eingangsdaten	109
6.3	Implementierung	112
6.3.1	Überblick	112
6.3.2	Simulationsarchitektur	113
6.3.3	Simulationslayout	114
6.3.4	Simulationslogik	117
6.3.5	Verifikation und Validierung	121
6.4	Datensammlung	122
6.5	Datenaufbereitung	123
6.6	Experiment	128
6.7	Diskussion	130
7	Anwendungsbeispiel 3: Pfahlherstellung im Spezialtiefbau	133
7.1	Einleitung	133
7.2	Modellierung	134
7.2.1	Überblick	134

7.2.2	Baufaufgabe	135
7.2.3	Prozesse und Ressourcen	136
7.2.4	Einflussgrößen	139
7.2.5	Eingangsdaten	140
7.3	Implementierung	142
7.3.1	Überblick	142
7.3.2	Simulationsarchitektur	142
7.3.3	Simulationslayout	142
7.3.4	Simulationslogik	143
7.3.5	Verifikation und Validierung	143
7.4	Datensammlung	144
7.5	Datenaufbereitung	147
7.5.1	Überblick	147
7.5.2	Aktivitätserkennung mit Hilfe von Maschinellern Lernen	148
7.5.3	Aktivitätserkennung mit Hilfe von Deep Learning	158
7.5.4	Hierarchische Klassifizierungsstudie zum Einfluss der Datenmodellierung bei der Aktivitätserkennung	163
7.5.5	Diskussion	171
7.6	Datenübertragung	172
7.6.1	Überblick	172
7.6.2	Modellierung	173
7.6.3	Implementierung	174
7.6.4	Testaufbau	175
7.6.5	Diskussion	176
7.7	Experiment	176
7.8	Diskussion	178
8	Diskussion	181
8.1	Vergleich der Anwendungsbeispiele	181
8.2	Bewertung des Vorgehensmodells anhand der Forschungsfragen	186

8.3 Limitationen des Vorgehensmodells	190
9 Zusammenfassung und Ausblick	193
9.1 Zusammenfassung	193
9.2 Ausblick	196
Literaturverzeichnis	199
Verzeichnis betreuter Studienarbeiten	233
Verzeichnis der Veröffentlichungen	237
Abbildungsverzeichnis	241
Tabellenverzeichnis	251
A Ergänzungen zu den Grundlagen	A-1
B Ergänzungen zum Anwendungsbeispiel 2	B-1
C Ergänzungen zum Anwendungsbeispiel 3	C-1
C.1 Ergebnisse der Modellierung	C-1
C.2 Ergebnisse der Datensammlung	C-4
C.3 Ergebnisse der Datenaufbereitung	C-5
C.3.1 Hyperparameter der implementierten Modelle	C-5
C.3.2 Hierarchische Klassifizierungsstudie mit ANN- und DeepConvLSTM- Modellen	C-6
C.4 Ergebnisse des Experiments	C-10

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
ACD	Activity Cycle Diagram
ANN	Artificial Neural Network
API	Application Programming Interfaces
BiLSTM	Bidirektionales LSTM
BIM	Building Information Modeling
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BPMN	Business Process Modeling Notation
BPPR	Bau-Produkt-Prozess-Ressourcen
CAD	Computer Aided Design
CNN	Convolutional Neural Network
CRISP-DM	Cross-Industry Standard Process model for Data Mining
DDS	Distribute Device Data for Real Time Systems
DeepConvBiLSTM	Deep Convolutional bidirectional LSTM
DeepConvLSTM	Deep Convolutional LSTM
DES	Discrete-Event Simulation
DL	Deep Learning
DT	Decision Tree
EG	Erdgeschoss
EHM	Entsorgungshilfsmittel
ERP	Enterprise Resource Planning
FIFO	First-In-First-Out
fml	Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik
GIS	Geographic Information System

GPS	Global Positioning System
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
IMU	Inertial Measurement Unit
IoT	Internet of Things
JIT	Just-in-Time
KDK	Kraftdrehkopf
KI	Künstliche Intelligenz
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
kNN	k-Nearest Neighbor
KW	Kalenderwoche
LDL	Logistikdienstleistung
LHM	Ladehilfsmittel
LKW	Lastkraftwagen
LoD	Level of Detail
LoRa	Long Range
LR	Logistic Regression
LSTM	Long Short-Term Memory
ML	Machine Learning
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
MSA	Microservice Architecture
MTA	Maschinentechnische Abteilung
NB	Naive Bayes
NFC	Near-Field Communication
NP	Nichtdeterministische polynomielle Zeit
OG	Obergeschoss
OPC-UA	Open Platform Communication Unified Architecture
PDCA	Plan-Do-Check-Act

QR	Quick Response
RAMI	Referenzarchitekturmodell
ReLU	Rectified Linear Unit
REST	Representational State Transfer
RFID	Radio Frequency Identification
RNN	Recurrent Neural Network
SHAP	Shapley Additive Explanations
SOA	Service Oriented Architecture
SQL	Structured Query Language
SVM	Support Vector Machine
TaT	Tracking and Tracing
TCP	Transmission Control Protocol
TE	Transporteinheit
TG	Transportgut
THM	Transporthilfsmittel
TUL	Transportieren Umschlagen Lagern (TUL-Aktivitäten)
TUM	Technische Universität München
UG	Untergeschoss
UWB	Ultra-Wideband
WLAN	Wireless Local Area Network

Formelzeichenverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
$F1$	–	Gesamtleistung eines ML-Modells
FN	–	Falsche falsche Vorhersage (engl. False Negatives)
FP	–	Falsche richtige Vorhersage (engl. False Positives)
TN	–	Richtige falsche Vorhersage (engl. True Negatives)
TP	–	Richtige positive Vorhersage (engl. True Positives)
$accuracy$	–	Genauigkeit von ML-Modellen
$error$	–	Empirische Fehlerrate von ML-Modellen
$t_{(j)}$	–	Schwellenwert
w_j	–	Gewichtung
y_j	–	Ausgangssignal bei einem Perzeptron

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Motivation

Günthner und Zimmermann [Gün-2008] rückten die Bedeutung der Baulogistik in den Fokus der Bauindustrie – von einer singulären Betrachtung von Ver- und Entsorgung hin zu einem prozessorientierten Logistikmanagement wie in der stationären Industrie.

Eine effiziente Baulogistik begünstigt einen störungsfreien Bauprozess [Gün-2008]. Entscheidend dafür ist die Nutzung von Informationen, die mit der Planung, dem Betrieb und der Kontrolle der eigentlichen Produktion auf der Baustelle verbunden sind. Durch „Bauen 4.0“, der Adaption von Industrie 4.0 in die Bauindustrie, liegen diese Informationen in digitaler Form vor [Bec-2023]. Für die Baulogistik ergeben sich dadurch neue Möglichkeiten, ihr Potenzial zu entfalten.

Abbildung 1-1 zeigt einen Überblick der auf die Bauindustrie übertragenen Industrie 4.0-Begriffe, auf die im Folgenden eingegangen wird.

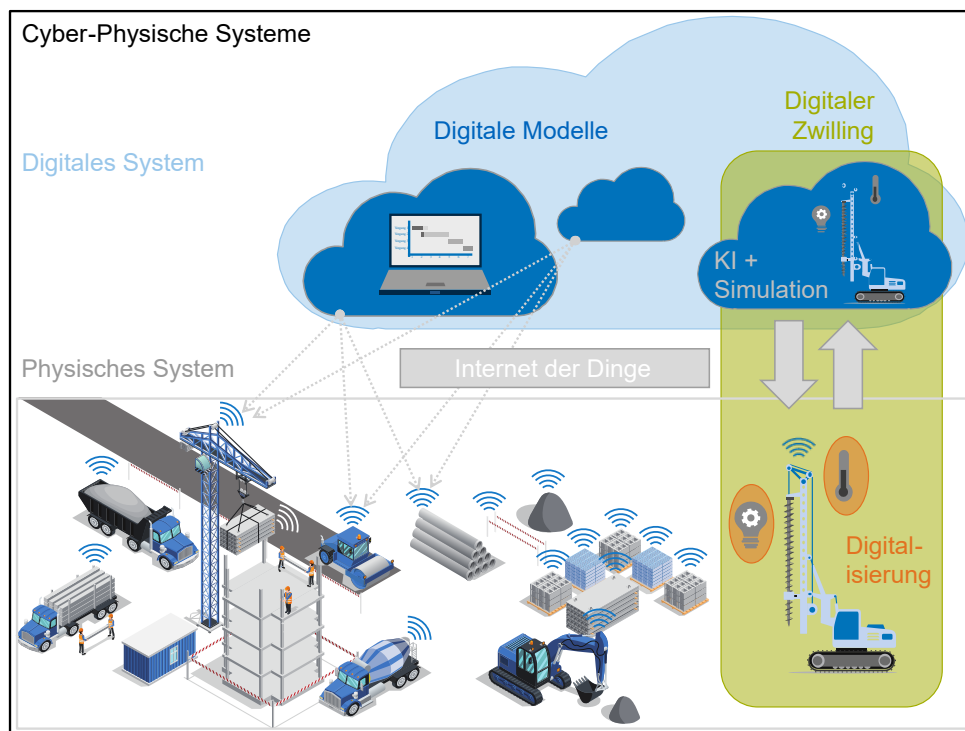


Abbildung 1-1: Übersicht auf die Bauindustrie übertragenen Industrie 4.0-Begriffe (eigene Darstellung nach [Fis-2023b])

Der Begriff „Industrie 4.0“ wurde in Deutschland im Zuge der High-Tech Strategie 2020 ins Leben gerufen [Kag-2013; Las-2014]. Ziel ist der Einsatz digitaler Technologien im Bereich Kommunikation, Vernetzung und Datenanalyse.

Damit wird an die drei technologischen Revolutionen der Mechanisierung, Elektrifizierung und Digitalisierung angeknüpft und der Wandel von einer klassischen Wertschöpfungskette hin zu dynamischen Wertschöpfungsnetzwerken eingeleitet.

Die Vernetzung dieser Objekte baut zunächst vor allem auf ihrer Digitalisierung auf [Ful-2020]. Durch die Anbringung und Anbindung von Hardware, in Form von Sensorik und Computern, werden Daten generiert. Dabei ist es das Ziel, jedes Objekt zu jeder Zeit und für alle verständlich zu identifizieren [DIN-91345]. Die Simulation ist das digitale Modell dieses physischen Systems, um Zusammenhänge vorab durchzuspielen.

Die Industrie 4.0-Technologien ermöglichen nun die Nutzung der Daten durch die Verknüpfung der physischen und digitalen Systeme. Das Internet der Dinge (engl. Internet of Things (IoT)) ermöglicht den Austausch der Daten und die Kommunikation via Internet. Die Künstliche Intelligenz (KI) hilft, die Objekte selbst „intelligent“ zu machen, indem die Daten selbstständig analysiert werden, um Informationen zu generieren. Der Digitale Zwilling bildet den logischen dynamischen Zusammenschluss der physischen und digitalen Systeme, um die gesammelten und aufbereiteten Informationen für die Simulation zu nutzen. Insgesamt entstehen so vernetzte dezentrale Systeme, zusammengefasst unter dem Begriff des Cyber-physischen Systems.

Im Kontext der industriellen Produktion ermöglicht die Industrie 4.0 eine weitere Flexibilisierung und Produktivitätssteigerung durch die zunehmende Selbstorganisation und Verzahnung von Logistik- und Produktionsprozessen [Kag-2013]. Das Produktivitätswachstum im Allgemeinen ist ein wichtiger Anhaltspunkt für den zukünftigen Wohlstand einer Gesellschaft, deren Wirtschaftswachstum sowie deren Wettbewerbsfähigkeit [Mai-2017]. Damit verbunden sind z. B. verbesserte Arbeitsbedingungen oder die Versorgung öffentlicher Einrichtungen für Kinder, Ältere oder Bedürftige.

Diese Produktivitätssteigerung bleibt in der Bauindustrie bislang noch aus [McK-2017]. Das gemessene Produktivitätswachstum in realer Bruttowertschöpfung pro Arbeitsstunde der Beschäftigten im Zeitraum von 1995–2014, lag in der Bauindustrie jährlich im Durchschnitt um 2,6 % unterhalb der stationären Fertigungsindustrie, was angesichts ihrer ökonomischen Bedeutung eine ihrer größten Herausforderungen ist.

Allein in Deutschland beschäftigt die Bauindustrie fast eine Million Menschen bei einem Umsatz von 145 Milliarden Euro im Jahr 2021 [Sta-2022]. Dabei ist der Umsatzanteil von kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) mit 78 % überdurchschnittlich hoch (im Vergleich erzielten KMU insgesamt nur 30 % des branchenübergreifenden Umsatzes, die restlichen 70 % dominieren Großunternehmen) [Sta-2021]. Weltweit waren im Jahr 2014 7 % der Gesamtbevölkerung in der Bauindustrie beschäftigt und die weltweiten Ausgaben betrugen umgerechnet ca. 10 Billionen Euro, was 13 % des globalen Bruttoinlandsprodukts entsprechen [McK-2017]. Die Bauindustrie zählt damit zum größten Sektor der Weltwirtschaft und

liegt noch vor vergleichbaren Industriebranchen, wie dem verarbeitenden Gewerbe. Hochrechnungen zufolge soll durch die Adaption von Industrie 4.0 ein Wachstum der Bauindustrie von 0,5 % bis 2,9 % des jährlichen globalen Bruttoinlandsprodukts möglich sein [BCG-2017; McK-2017; PWC-2016].

1.2 Herausforderungen bei der Adaption von Industrie 4.0

In der Praxis zeigt sich allerdings, dass die Adaption von Industrie 4.0 in der Bauindustrie noch vor Herausforderungen steht, wie z. B. dem geringen Grad an Digitalisierung und den bauspezifischen Randbedingungen (siehe Tabelle 1-1).

Tabelle 1-1: Herausforderungen der Bauindustrie im Kontext von Industrie 4.0 (eigene Darstellung nach [Bec-2023, S. 19–67; Gün-2011, S. 208 ff.; Hor-2014, S. 4 ff.])

Grad der Digitalisierung	Bauspezifische Randbedingungen
• Manuelle und auf Erfahrungswerten basierende Planung • Keine durchgängige digitale Erfassung von Bauobjekten und deren Prozesse durch die verschiedenen Bauphasen hinweg • Keine automatisierte Erfassung und Soll-Ist-Abgleich der Bauausführung • Einsatz von proprietären Plattformen ohne einheitliche Schnittstellen	• Unikatcharakter jedes einzelnen Bauobjekts • Veränderlichkeit des Umfelds in Ort und Zeit • Orts- und Witterungsabhängigkeit • Starke Fragmentierung und Segmentierung führt zu Informationsbrüchen • Vielfältiger und inhomogener digitaler Technologieeinsatz

Der Grad der Digitalisierung ist in der Bauindustrie vergleichsweise gering [Gan-2016; McK-2016]. Die Planung erfolgt oft noch manuell und basierend auf Erfahrungswerten [Bec-2023, S. 19–67]. Es gibt keine durchgängige digitale Erfassung von Objekten und deren Prozesse über die Lebensphasen hinweg [Gün-2011]. Die Datensammlung zur Kontrolle des Baufortschritts erfolgt in der Praxis noch nicht automatisiert [Gog-2017]. Aufgrund fehlender einheitlicher Schnittstellen und proprietärer Plattformen existieren größtenteils Insellösungen [Bec-2023, S. 19–67].

Setzen Unternehmen digitale Technologien ein, so verlangsamen diese derzeit die Prozesse anstatt sie zu verbessern, z. B. bei der Verfolgung von Materialflüssen [Dan-2020]. Die meisten dieser Technologien befinden sich daher noch in der Testphase (42 %) oder sind Visionen (21 %), wie Ergebnisse einer internetbasierten Umfrage des Lehrstuhls für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml) der Technischen Universität München (TUM) im Rahmen des Verbundprojekts Bauen 4.0 mit 74 Teilnehmenden aus der Bauindustrie zeigen [Bec-2023, S. 19–67]. Die Ergebnisse sind in Abbildung 1-2 zusammengefasst. Nur ein Drittel der digitalen Technologien befindet sich bereits standardmäßig im Einsatz, z. B. der elektronische Lieferschein (26 %) oder digitale Modelle von Gebäuden, auch Building Information Modeling

(BIM) genannt (38 %). Insbesondere die Simulation wird mit 12 % verhältnismäßig selten eingesetzt. Dabei entscheidend ist der Grad der Digitalisierung im Unternehmen: Je höher dieser eingeschätzt wird, desto höher die Wahrscheinlichkeit, dass die Simulation bereits eingesetzt wurde.

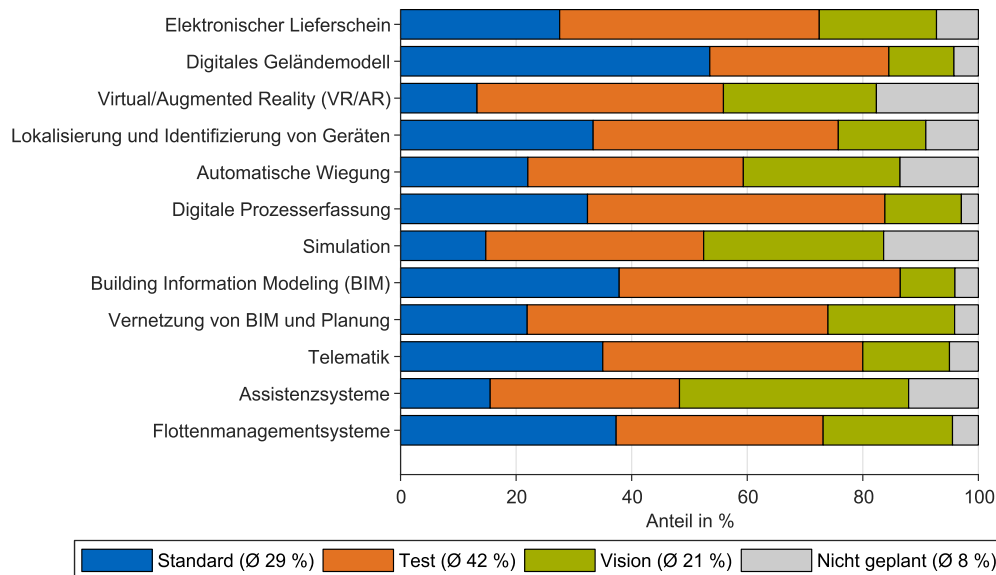


Abbildung 1-2: Ergebnisse der Umfrage in [Bec-2023, S. 19–67] zur Anwendung von digitalen Technologien im Unternehmen (74 Teilnehmende; eigene Darstellung)

Die Einführung digitaler Technologien wird dabei von bauspezifischen Randbedingungen erschwert [Bec-2023, S. 19–67]. Das Produkt in der Bauindustrie ist das Bauobjekt (Gebäude oder Infrastruktur). Die Produktionsfaktoren sind orts- und zeitgebunden, was eine erhöhte Flexibilität erfordert. Gründe hierfür sind Umwelteinflüsse, wie z. B. Witterung und Geologie, aber auch verfügbares Personal. Auch wenn einzelne Teile oder sogar ganze Module (seriell) vorgefertigt werden können, so ist der Zusammenbau auf der Baustelle vor Ort eine Einzelfertigung. Der Anteil an KMU, mit teils hohen Spezialisierungen, ist sehr hoch (Fragmentierung), ebenso wie deren Verteilung auf einzelne Bauphasen (Segmentierung). Dies führt zu einem vielfältigen inhomogenen digitalen Technologieeinsatz zwischen und innerhalb von Unternehmen und Bauphasen.

1.3 Problemstellung beim Einsatz von Simulation

In der Logistik der stationären Industrie hat sich die ereignisdiskrete bzw. -orientierte Simulation, im Folgenden kurz Simulation genannt, von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen als geeignete digitale Technologie bewährt [VDI-3633]. Gegenüber herkömmlichen analytischen Verfahren bietet diese Simulation die Möglichkeit, einen dynamischen Prozess vorab zu testen und Variantenuntersuchungen aufwandsarm durchzuführen. Mittlerweile wird sie in allen Phasen der Planung, Realisierung und des Betriebs eingesetzt.

In der Bauindustrie weist die Forschung schon länger auf die Bedeutung und Möglichkeiten von Simulation hin [Abo-2010; Gün-2009]. Anhand verschiedener Anwendungsbeispiele aus der Baupraxis wird ihr Mehrwert deutlich [Gün-2009; Gün-2010; Gün-2011; Gün-2015]. Die Simulationen erfolgen vorab oder während der Bauausführung. So können alternative Bauprozesse durchgespielt werden sowie Geräteeinsätze und Pufferauslastungen untersucht werden, um die optimale Auslastung zu bestimmen. Letztlich können auf Basis der Ergebnisse Entscheidungen über das weitere Vorgehen getroffen werden [Abo-2010].

Insbesondere die Baulogistik zeigt ein hohes Potenzial: Allein deren Planung steigert die Produktivität [Aga-1998], führt nachhaltig zu Zeit- und damit Kosteneinsparungen [Mou-2021] und reduziert die Umweltbelastung [Lip-2004]. Boenert und Blömeke [Boe-2006] stellten fest, dass in der Bauausführungsphase 30 % der Arbeitszeit für die Logistik aufgewendet werden, z. B. für den Transport, die Suche oder die Umlagerung von Materialien oder für Aufräumarbeiten. Sie schätzen, dass 10 % der Gesamtarbeitszeit durch eine bessere Logistikplanung eingespart werden könnten. Darüber hinaus stellten Lindén und Josephson [Lin-2013] fest, dass die Kosten um etwa 20 % gesenkt werden können, wenn die Materialhandhabung durch einen Logistikplan organisiert wird, der von einem externen Logistikpartner ausgeführt wird.

Laut der bereits erwähnten Umfrage in [Bec-2023, S. 19–67], liegen die Erfahrungen zu den Vorteilen der Simulation insbesondere im Einsatz zur Erprobung verschiedener Ausführungsvarianten und Prozessreihenfolgen sowie in der Einsparung von Prozesszeiten durch den geeigneten Geräteeinsatz [Bec-2023, S. 19–67]. Die vornehmlich im deutschsprachigen Raum durchgeführte Umfrage wird auch im internationalen Kontext bestätigt [Lei-2016]. Simulation wird demnach überwiegend zur Optimierung von Prozessen zur Produktivitätssteigerung eingesetzt, weniger zur Prozessüberwachung.

Insgesamt zeigt sich allerdings, dass die Simulation noch nicht in der Praxis angekommen ist [Abd-2020b; Abo-2010; Bec-2023, S. 19–67; Lee-2013]. Insbesondere KMU wenden die Simulation nicht an [Fei-2016]. Wenn, dann findet die Simulation bisher hauptsächlich in der Planungsphase statt [Akh-2013; Lei-2016; Oso-2021]. Die Gründe dafür gehen einher mit den Herausforderungen bei der Adaption von Industrie 4.0 (siehe Tabelle 1-1). Für den Einsatz der Simulation in der Praxis sind diese Randbedingungen zu berücksichtigen:

1. Der Unikatcharakter führt zu einer individuellen **Modellierung** und damit hohem Aufwand [Fei-2016; Wim-2014];
2. Die Segmentierung führt zu unterschiedlichen Bedürfnissen und damit **Betrachtungsebenen** in den jeweiligen Phasen und zu keiner **Durchgängigkeit** über die Phasen hinweg [Jaz-2020];
3. Die Fragmentierung führt zu unterschiedlichen **Rollen** und damit Auffassungen und Bedürfnissen hinsichtlich deren Zielvorstellungen [Fis-2023a];

4. Die hohe Volatilität führt zu vielen **Änderungen**, wodurch das Modell an die neuen Randbedingungen angepasst werden muss [Lei-2016].

Insbesondere der letzte Punkt eröffnet die Möglichkeiten, die **Simulation als Teil eines Digitalen Zwillings** zu betrachten (siehe Abbildung 1-1 in grün). Durch die Übertragung von gesammelten und aufbereiteten Daten während des Prozesses wird ermöglicht, die Simulation zu aktualisieren und damit wieder als Entscheidungsunterstützung heranzuziehen [Hor-2012]. Dieser Digitale Zwilling ermöglicht eine durchgängige Funktionalität über Bauphasen hinweg [Jaz-2020].

Unter Berücksichtigung der zu beachtenden bauspezifischen Randbedingungen und dem geringen Grad an Digitalisierung (siehe Tabelle 1-1) ergeben sich, abgeleitet für die Simulation als Teil des Digitalen Zwillings, folgende Problemstellungen:

1. **Datensammlung:** Daten sind teilweise nicht vorhanden und sollen zunächst gesammelt werden;
2. **Datenaufbereitung:** Daten sind nicht in der Form verfügbar, in der sie benötigt werden, und sollen aufbereitet werden;
3. **Datenübertragung:** Daten werden nicht oder manuell übertragen und sollen automatisiert in die Simulation eingebunden werden;
4. **Datennutzung:** Daten werden in der Simulation nicht genutzt und sollen entsprechend den Anforderungen der Anwendungsbeispiele einer Simulation eingesetzt werden.

1.4 Forschungsfragen

Die Simulation ist eine anerkannte, aber noch nicht weit verbreitete, digitale Technologie zur Planung von komplexen Zusammenhängen in der Baulogistik. Sie ermöglicht verschiedene Varianten vorab durchzuspielen. Im Zuge von Bauen 4.0 ermöglicht nun die Erweiterung der Simulation zum Digitalen Zwilling eine adaptive Reaktion auf Störungen im Bauproduktionssystem durch die Einbindung von Daten.

Ähnlich zu einem Regelkreis (siehe Abbildung 1-3) weisen die Planung, der Betrieb und die Kontrolle in einem Bauproduktionssystem eine Vielzahl von Randbedingungen auf, die zu einer hohen Komplexität führen [Gün-2011, S. 161]. Störungen durch Unvorhersehbares bringen zudem eine starke Volatilität in das Bauproduktionssystem mit ein. Mit dem Soll-Ist Vergleich als Messglied wird versucht, den Unterschied des geplanten und des ausgeführten Bauprozesses zu finden. Das ermöglicht dem Regler, als Regelglied durch eine erneute Planung darauf zu reagieren. Diese Reaktion basiert heute noch immer stark auf analytischen Vorgehensweisen.

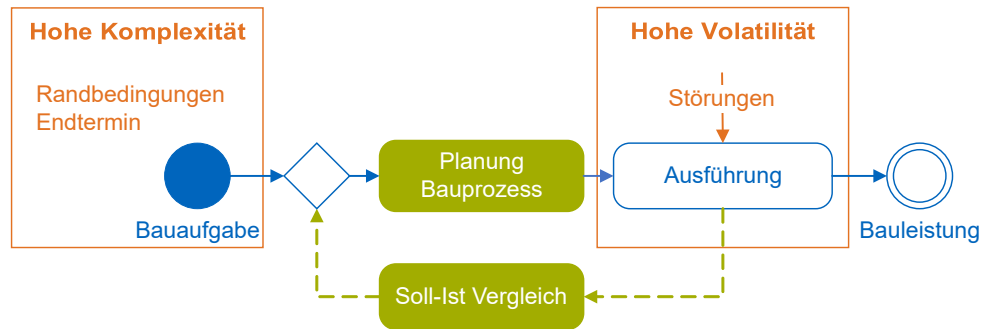


Abbildung 1-3: Planung, Betrieb und Kontrolle des Bauproduktionssystems als Regelkreis (orange: bau-spezifische Randbedingungen; grün: geringer Grad an Digitalisierung; eigene Darstellung nach [Gün-2011, S. 161])

Somit leitet sich die folgende wissenschaftliche Fragestellung für diese Arbeit ab: *Wie kann ein Vorgehensmodell für die Entwicklung von Digitalen Zwillingen aus ereignisorientierter Simulation in Kombination mit Prozessdaten zur Optimierung des Bauproduktionssystems für die Baulogistik aussehen?*

Die Definition des Digitalen Zwillings wird dabei als Ansatz für die Rückkopplung von Daten aus dem physischen in das digitale System gesehen [Vog-2024]. Dabei beschränkt sich das physische System auf die Betrachtung von Prozessen aus Sicht der Baulogistik. Das digitale System beschränkt sich auf die Einbindung von Simulation. Ziel des Digitalen Zwillings ist die Analyse und Optimierung des Bauproduktionssystems. Weiterhin besteht das Ziel der Arbeit darin, ein generisches Vorgehensmodell abzuleiten, welches über die Entwicklung eines Digitalen Zwillings und dessen Komponenten hinausgeht. Mit Hilfe des Vorgehensmodells soll ermöglicht werden, nicht nur einen Digitalen Zwilling nach gegebenen Randbedingungen und Bedürfnissen zu gestalten, sondern auch in den Prozess zu integrieren. Ein modulares Vorgehensmodell zur Datensammlung, -aufbereitung, -übertragung und -nutzung wird entwickelt, um Digitale Zwillinge in der Baupraxis zum Einsatz zu bringen. Damit folgt die Arbeit dem Ansatz von Sacks et al. [Sac-2020], wonach ein Digitaler Zwilling für die Baulogistik mehr als eine digitale Repräsentation ist, sondern eine Vorgehensweise beschreibt.

Um neben der Entwicklung von Digitalen Zwillingen in der Baulogistik, auch deren Adaption mit Hilfe eines Vorgehensmodells abzuleiten, wird die Forschungsfrage in die nachfolgenden drei Unterfragen unterteilt:

1. *Welche Aspekte müssen bei der Umsetzung eines simulationsgestützten Digitalen Zwillings für die Baulogistik berücksichtigt werden?*

In der Literatur existieren verschiedene Definitionen für den Digitalen Zwilling im Bau. Diese Arbeit fokussiert sich auf die Herausstellung der Besonderheiten in der Baulogistik. Der Betrachtungsgegenstand ist die Produktions- und Informationslogistik in der Bauindustrie. Die Ausarbeitung des Bauproduktionssystems, hinsichtlich organisatorischer und technischer Gestaltung im Zeitalter von Industrie 4.0, bildet die Basis für die Arbeit.

2. *Wie können simulationsgestützte Digitale Zwillinge für unterschiedliche Anwendungsbereiche der Baulogistik modelliert und umgesetzt werden?*

Durch die Interdisziplinarität der Baulogistik gibt es verschiedene Anwendungsbeispiele für die ereignisorientierte Simulation und damit den Digitalen Zwilling in der Bauindustrie – vom Hochbau bis zum Tiefbau. Für die Integration in die Baupraxis ist es zwingend erforderlich, den jeweiligen Digitalisierungsgrad und die Randbedingungen zu berücksichtigen. Im Rahmen der Arbeit sollen diese Besonderheiten anhand von drei repräsentativen Anwendungsbeispielen aufgezeigt und miteinander verglichen werden. Dazu dient das Vorgehensmodell, das mit Hilfe von Bausteinen verschiedene Methodiken und damit eine systematische Herangehensweise an unterschiedliche Problemstellungen liefern soll. Dabei wird auf verschiedene Entwicklungsstufen eines Digitalen Zwillings in der Baulogistik eingegangen, da dessen Einführung, wie auch die digitalen Technologien innerhalb seiner Bausteine, noch am Anfang stehen und daher ein Vorgehensmodell zur Entwicklung und Integration in die Praxis erforderlich ist [Abd-2017; Sac-2020].

3. *Welche Effekte und Potenziale ergeben sich aus den simulationsgestützten Digitalen Zwillingen?*

Unter Berücksichtigung der Randbedingungen und Bedürfnissen der vorgestellten Anwendungsbeispiele wird die Generalisierbarkeit des Vorgehensmodells bewertet. Die quantitative Beurteilung erfolgt anhand der zuvor aufgestellten Merkmalsausprägungen für den Digitalen Zwilling in der Baulogistik. Dadurch soll herausgestellt werden, inwiefern bisherige Simulationsansätze sinnvoll ergänzt werden können.

Die Vorgehensweise zur Beantwortung der formulierten Forschungsfragen sowie deren Widerspiegelung im Aufbau dieser Arbeit werden im nächsten Abschnitt 1.5 aufgezeigt.

1.5 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

Zur Beantwortung der Forschungsfrage gliedert sich die Arbeit in sechs Blöcke mit insgesamt neun Kapiteln (siehe Abbildung 1-4).

Ausgehend von den Möglichkeiten und Herausforderungen bei der Einführung von digitalen Technologien im Zuge von Industrie 4.0 für die Baulogistik, werden in Kapitel 1 Forschungsfragen formuliert sowie die Vorgehensweise zu deren Beantwortung aufgezeigt.

Als Basis zur Beantwortung der Forschungsfragen dienen die Kapitel 2 und 3. So werden zunächst die Grundlagen geklärt, um dann aus verwandten Arbeiten die Forschungslücke abzuleiten (Abschnitt 3.3).

Kapitel 4 erläutert den Lösungsansatz und die Vorgehensweise zur Untersuchung der identifizierten Forschungslücke. Anhand von drei ausgewählten Anwendungsbeispielen in den

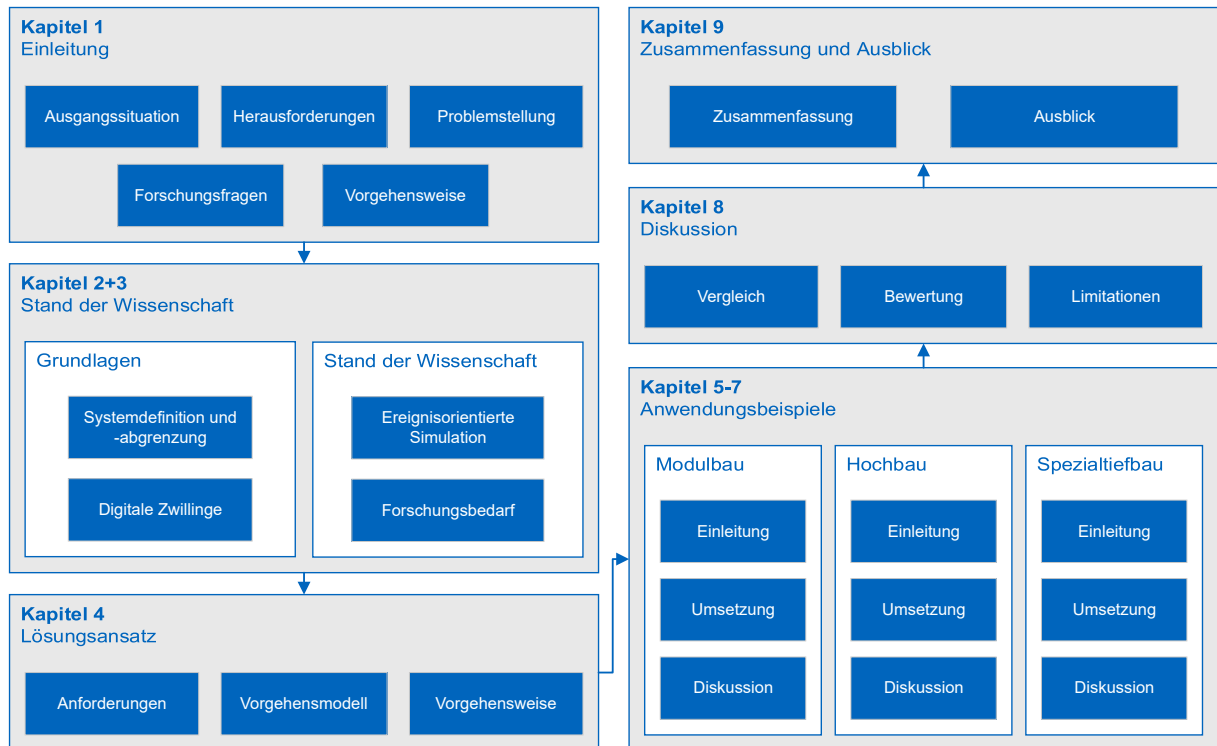


Abbildung 1-4: Aufbau der Arbeit (eigene Darstellung)

Kapiteln 5 bis 7 wird das Vorgehensmodell für simulationsgestützte Digitale Zwillinge in der Baulogistik angewendet. Jedes Anwendungsbeispiel folgt dabei der gleichen Struktur: Einleitung, Umsetzung und Diskussion. In allen drei Anwendungsbeispielen wird das Vorgehensmodell auf die Implementierung von Digitalen Zwillingen mit unterschiedlich ausgeprägten Reifegraden vorgestellt. Das methodische Vorgehen innerhalb der Bausteine variiert je nach Ausprägung bzw. eingesetzter digitaler Technologie.

Eine abschließende Bewertung des Vorgehensmodells erfolgt anhand eines qualitativen Vergleichs der drei Anwendungsbeispiele in Kapitel 8.

Die Arbeit schließt in Kapitel 9 mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick für weitergehende Entwicklungen von Digitalen Zwillingen in der Baulogistik sowie ihrer Integration und Evaluierung in der Praxis.

2 Grundlagen von Digitalen Zwillingen in der Bauindustrie

2.1 Systemdefinition und -abgrenzung

2.1.1 Charakteristik der Bauindustrie

Im Folgenden werden zunächst wesentliche Definitionen und Bestandteile geklärt werden, um den Betrachtungsraum zu detaillieren. Der Überbegriff für das Fachgebiet des Bauens ist das *Bauwesen*. Die *Bauwirtschaft* umfasst alle Bauphasen im Lebenszyklus eines Bauwerks (von der Entwicklung, Realisierung über die Nutzung und Erhalt bis hin zu Umbau und Rückbau). Aus volkswirtschaftlicher Sicht spricht das Statistische Bundesamt vom *Baugewerbe* [Brö-2015, S. 7 ff.]. Im deutschen Sprachgebrauch wird weiter zwischen der *Bauindustrie* und dem *Bauhandwerk* getrennt [Brö-2015, S. 7 ff.]. Die Bauindustrie umfasst größere, arbeitsteilig organisierte Unternehmen des Bauhauptgewerbes. Das Baugewerbe entspricht kleineren, handwerksmäßigen Betrieben. Deutlich wird dieser Unterschied insbesondere durch die vertretenden Verbände, dem Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e. V. und dem Zentralverband des Deutschen Baugewerbes e. V. Die handwerklichen und bautechnischen Arbeiten werden als *Gewerke* bezeichnet.

Die Bauindustrie wird in zwei *Bauhauptgewerbe*, den Hochbau und den Tiefbau, und die *Ausbaugewerbe* (früher Baunebengewerbe) unterteilt, zu welchen auch die Baulogistik zählt [Sta-2008b; Sta-2008a]. Innerhalb der Bauhauptgewerbe gibt es weitere Untergliederungen in Teilbereiche nach den Bauverfahren. Im Hochbau wird in Rohbau und Ausbau unterschieden. Außerdem gibt es die industrielle Vorproduktion von Bauwerken, zu dem der Modulbau zählt. Der Tiefbau unterscheidet zwischen dem Erdbau, dem Tunnelbau oder dem Spezialtiefbau für Tiefgründungen und Wasserhaltungen. Im Englischen wird allgemein auch von „On-Site“ und „Off-Site“ Produktion gesprochen [Mos-2016]. Neben dem Baugewerbe umfasst die *Wertschöpfungskette Bau* auch Bauträgerschaft, Baustoffherstellung bzw. -handlung, Maschinen- und Werkzeugzulieferung sowie Verbände und Forschungseinrichtungen [Brö-2015, S. 10; Gir-2006, S. 5].

Die eigentliche *Baufaufgabe* stellt der *Bauherr* bzw. die *Bauherrschaft*, die im Bauwesen gängige Bezeichnung für den Auftraggebenden. Die weiteren Rollen und ihre Beziehungen sind im Organigramm in Abbildung A-1 in Anhang A am Beispiel des Spezialtiefbaus verdeutlicht. Dabei wird vor allem die Fragmentierung, d. h. mehrere Beteiligte über die Bauphasen hinweg, deutlich. Die Definition der *Bauphasen* orientiert sich dabei an den

Phasen zur Leistungsbeschreibung von Architekt*innen und Ingenieur*innen [AHO-2021] und der Projektsteuerung [AHO-2020], zitiert nach [Brz-2023, S. 29; Koc-2018, S. 43 ff.]: (1) Entwurf, (2) Planung, (3) Ausführung, (4) Betrieb.

2.1.2 Charakteristik der Baulogistik

Die Baulogistik versteht sich als übergreifenden, nicht eigenständigen Bereich in der Bauwirtschaft [Gün-2011, S. 205 f.; Voi-2014, S. 11]. Der Begriff „Baulogistik“ wurde erst ab den Neunzigerjahren geprägt [Voi-2014, S. 19]. Davor wurden logistische Themen unter dem Begriff der Arbeitsvorbereitung behandelt. Ihr Einspar- und Optimierungspotenzial gegenüber den Bauhauptgewerben wird noch immer nicht voll ausgeschöpft [Fis-2024; Gün-2008].

Abbildung 2-1 ordnet den Betrachtungsgegenstand dieser Arbeit in den Kontext der Baulogistik ein. In der Vertikalen sind die dreistufige Betrachtungsweise der Baulogistik in (1) operativer, (2) koordinativer und (3) vernetzender Ebene aufgezeigt, in der Horizontalen die Bauphasen der Planung und der Ausführung.

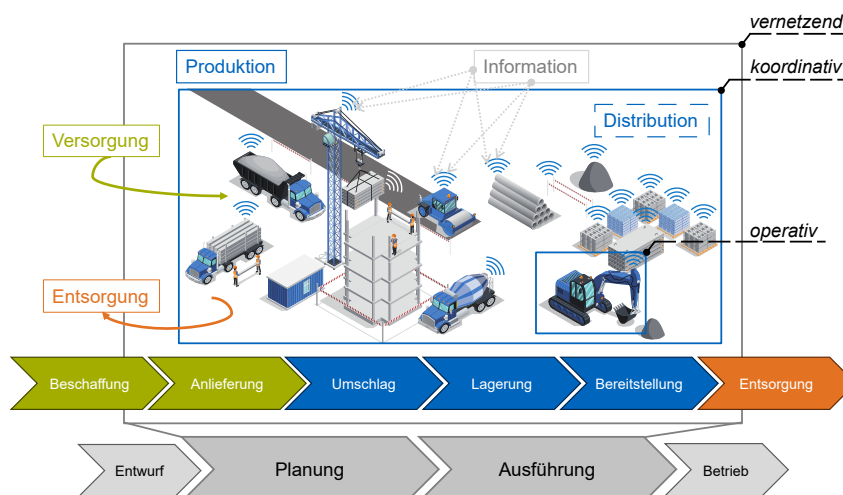


Abbildung 2-1: Betrachtungsgegenstand dieser Arbeit: Die Baulogistik und ihre Ebenen, eingeordnet in die verschiedenen Bauphasen (eigene Darstellung nach [Gün-2011, S. 205 f.; Voi-2014, S. 10])

Auf der untersten, der *operativen Ebene*, werden die Materialflüsse betrachtet. Dazu gehören die sogenannten TUL-Aktivitäten: (T) Transportieren (Veränderung von Objekten im geographischen Raum), (U) Umschlagen (Veränderung der Ordnung und Anordnung von Objekten) und (L) Lagern (Überbrückung von Zeitdifferenzen) [Kla-2008, S. 326].

Die mittlere *koordinative Ebene* beschäftigt sich mit der Planung, Realisierung, Steuerung und Kontrolle aller Ressourcen durch die Bauphasen hinweg [Fot-2022, S. 22]. Der Fokus liegt auf der prozessübergreifenden Koordination [Kla-2008, S. 42]. Das Ziel ist, wie auch in der Logistik der stationären Industrie, die Lieferung der richtigen Objekte zur richtigen Zeit am richtigen Ort in der richtigen Menge in der richtigen Qualität und zu den richtigen Kosten,

den richtigen Kund*innen bzw. richtigen Produktionsstätten, ökologisch richtig zur Verfügung zu stellen, was auch als die „Seven Rights“ der Logistik nach Plowman [Plo-1964], zitiert nach [Sch-2015], bezeichnet wird. Eine Avisierung, d. h. die (digitale) vorab Anmeldung von gelieferten Materialien kann dabei unterstützen [Kle-2023, S. 126].

Die oberste *vernetzende Ebene* umfasst das unternehmensübergreifende Management von Fließsystemen (engl. Flow bzw. Supply Chain Management). Es befasst sich mit der Strategie von übergeordneten Prozessen und Netzwerken über die Wertschöpfungskette hinweg.

Somit kann die Baulogistik mit einem Projektmanagement der „Versorgungsketten“ (engl. Supply Chains) oder auch Projektflussmanagement verglichen werden [Kla-2008, S. f.42]. Laut Klaus und Krieger [Kla-2008, S. f.42] befasst sich die Bauindustrie noch nicht mit unternehmensübergreifenden Themen. Gründe dafür sind die in Tabelle 1-1 genannten bauspezifischen Randbedingungen. Aktuelle Bestrebungen liegen daher in der Schaffung von Standards zur Beschreibung von baulogistischen Elementen [VDI-2023; Bui-2022].

Auf der horizontalen Ebene ist die zeitliche Einordnung der Baulogistik in die Bauphasen aufgetragen, wobei für diese Arbeit die Planungs- und Ausführungsphase in Betracht gezogen werden (siehe Abbildung 1-3). In diesen Phasen sind die vier aus der allgemeinen Logistik übertragenen Aufgabenbereiche hervorgehoben [Cla-2006, S. 31 f.; Gün-2008, S. 12; Voi-2014, S. 12 f.]: (1) Versorgung, (2) Produktion, (3) Entsorgung, (4) Information.

Die *Versorgungslogistik*, auch Beschaffungslogistik genannt, kümmert sich um die Beschaffung und Anlieferung (zur Baustelle hin) von Ressourcen zur Versorgung der Produktionslogistik (grüne Blockpfeile). Sie beinhaltet die Verkehrsplanung, z. B. die geeignete Routen- und Flächenplanung für die Materialanlieferung, Transportmittelwahl, Verkehrssicherung und Baustellenzufahrtsregelung.

Die *Produktionslogistik*, im Bauwesen auch Baustellenlogistik genannt, übernimmt die Ver- und Entsorgung der Ressourcen ab Anlieferung (auf der Baustelle) bis zur Auslieferung (weg von der Baustelle). Sie kümmert sich um deren Umschlag, deren Lagerung und deren Bereitstellung in der Produktionsstätte (blaue Blockpfeile). Im Vergleich zur stationären Industrie wird die *Distributionslogistik*, als räumliche und zeitliche Überbrückung zwischen Produktion und Betrieb, in der Baulogistik nicht mit aufgezählt. Traditionell findet die Distribution auf der Baustelle direkt statt und wird daher zur Produktionslogistik gezählt. Im Zuge der Industrialisierung und der zunehmenden Auslagerung von Bauteilen oder Modulen sowie der steigenden Komplexität von Lagerstandorten sollte auch die Distributionslogistik berücksichtigt werden.

Die *Entsorgungslogistik* umschließt alle Prozesse zur umweltgerechten Verwendung, Verwertung und Beseitigung von Reststoffen aus der Produktion (weg von der Baustelle, orangener

Blockpfeil) [Fot-2022]. Neben den Umweltaspekten sorgt sie für Arbeitsbedingungen mit mehr Struktur, damit Produktivität, und vor allem mehr Sicherheit [Lip-1999; Tho-1989; Tho-2005].

Die *Informationslogistik* ist für die bedarfsgerechte Versorgung der „richtigen Informationen zur richtigen Zeit“ zuständig [Cla-2006, S. 70]. Bedarfsgerecht bezieht sich dabei auf die Endnutzenden und umschließt somit die Datensammlung, -aufbereitung, -übertragung und -nutzung, einschließlich ihrer Visualisierung.

Der Betrachtungsgegenstand dieser Arbeit ist die Baulogistik, spezifischer deren Produktions- und Informationslogistik. Die Produktionslogistik ist geprägt von der Interdisziplinarität: Aus Managementsicht ist eine klare Abgrenzung zur Produktion [Gün-2000, S. 9] sowie zur Ver- und Entsorgungslogistik nicht möglich. Zum einen ist eine Betrachtung der Materialflüsse (operative Ebene), d. h. Ver- und Entsorgung auf der Baustelle, notwendig. Zum anderen sind Kenntnisse über die Produktion auf der Baustelle notwendig, um die Ver- und Entsorgung darauf auszurichten (koordinative und vernetzende Ebene).

Daneben ist die Informationslogistik für die digitale Integration des Digitalen Zwillinges von besonderer Bedeutung. Sie nimmt eine übergeordnete Funktion ein, um die Informationsflüsse innerhalb der Aufgabenbereiche der Baulogistik zu koordinieren. Sie dient als Schnittstelle zwischen der Übergabe der Güter von der Ver- und Entsorgung zur Baustelle und damit zwischen den Gewerken der Baulogistik und der Produktion.

Wird im Folgenden von der Baulogistik gesprochen, bezieht sich die Definition auf diese Unterscheidung in der Betrachtungsweise.

2.1.3 Charakteristik von Bauprozessen

Um einen Digitalen Zwilling für die Baulogistik einzuführen, ist es notwendig, die Bauprozesse des Gesamtsystems zu verstehen. Diese systemorientierte, ganzheitliche Sichtweise der Bauprozesse ist bereits ab der Planungsphase notwendig, um Engpässen in der Ausführung frühzeitig entgegenzutreten.

Die nachfolgende Beschreibung der Bauprozesse beschränkt sich auf die organisatorische Sichtweise nach Fiedler et al. [Fie-1991, S. 10]. Abgrenzend zur technologischen, betriebswirtschaftlichen oder juristischen Sichtweise liegt der Fokus bei der organisatorischen Sichtweise des Bauprozesses auf dem Baubetrieb. Unter dem Begriff *Baubetrieb* werden die Ausführung bzw. Produktion und deren (logistische) Bauprozesse zusammengefasst, die für den Betrieb und dessen Organisation in Planung (Bauproduktionsplanung) und Ausführung (Bauproduktionssteuerung) notwendig sind (siehe dunkelgraue Blockpfeile in Abbildung 2-1). *Bauprozesse* beschreiben somit alle Verfahren zur Erfüllung der Bauaufgabe innerhalb des Produktions- bzw. Leistungserstellungsprozesses (Planung und Ausführung). Dazu zählen

sowohl produktionstechnische als auch logistische Prozesse. Die Leistungserstellung ist die Produktion, d. h. die Ausführung, selbst [Tho-2020, S. 186]. Anstelle von Ausführung wird von Fertigung gesprochen, wenn es rein um die Produktion als materielle Umwandlung und Herstellung von Produkten geht. Im Folgenden wird vereinfacht der Begriff Produktion verwendet. Ein Produktionssystem beschreibt Prozesse der Produktion [Ber-1984].

Produktionssystem

Im Zuge der Industrialisierung der Bauindustrie wird versucht, die Produktion aus der stationären Industrie zu übertragen und das System der Bauwirtschaft als ganzheitliches Produktionssystem zu beschreiben [Bre-2015; Fie-1991, S. 14 ff.]. Ganzheitliche Produktionssysteme beinhalten Ziele, Unternehmensprozesse, Gestaltungsprinzipien bzw. Regeln, Methoden und Werkzeuge [VDI-2871].

Erste Ansätze zur Beschreibung von Bauproduktionssystemen gehen auf die *Kybernetik* zurück [Fie-1991, S. 14 ff.]. Sie betrachtet die Bauproduktion als Regelkreis. Aus kybernetischer Sicht ist das Bauproduktionssystem offen dynamisch und damit vergleichbar mit einem Regelkreis [Fie-1991, S. 28 f.] (siehe Abbildung 1-3). Die Eingangsgröße (Soll) stellt die *Bauproduktionsplanung* dar. Sie beschreibt, wie das Ziel zu erreichen ist. Die *Bauproduktionssteuerung* übernimmt die Regelstrecke und steuert nach, falls es zu Abweichungen durch die internen und externen Einflussfaktoren beim Soll-Ist-Abgleich über das Messglied kommt. Wichtig ist, dass diese Abweichungen gemessen werden, um die Zielvorgabe zu steuern.

Heute liefert *Lean Construction* Ansätze und Methoden zur Beschreibung von Bauproduktionssystemen. Lean Construction ist das Synonym für die Lean-Bewegung in der Bau- und Immobilienwirtschaft, die das Bauproduktionssystem ganzheitlich als Fluss betrachtet [Fie-2018, S. XII; GLC-2019, S. 15; Kos-1992]. Im Folgenden werden auf einzelne, für diese Arbeit relevante Ansätze und Methoden eingegangen. Weitere Ausführungen sind in der VDI-Richtlinie 2553 [VDI-2553] zu finden.

Eine proaktive Steuerung von Zielvorgaben liefert das Vorgehensmodell des Last Planner® Systems von Ballard [Bal-2000]. Das Last Planner® System umfasst fünf aufeinander aufbauende und miteinander verbundene Phasen für die Erstellung von Arbeitsplänen: Grob- und Phasenplanung (Was *soll* erledigt werden?), (6-Wochen-)Vorschauplanung (Was *kann* erledigt werden?), Wochenarbeitsplanung (Was *wird* erledigt?) und Tagesplanung (Was *ist* erledigt?).

Zum Erreichen dieser Ziele werden verschiedene Lean-Methoden angewendet, z. B. 5S zur Ordnung und Sauberkeit auf der Baustelle, Just-in-Time (JIT)-Anlieferung zur bedarfs-

synchronen Abstimmung der Logistik mit der Produktion, Taktplanung zur Organisation und Steuerung, Work-Breakdown-Structure zur Projekt- und Prozessdiagnose oder der PDCA-Zyklus (engl. Plan-Do-Check-Act) zur kontinuierlichen Verbesserung [Bal-2021].

Das Bauproduktionssystem nach Lean Construction besteht aus verschiedenen Elementen, um unter den gegebenen Zielen der Bauaufgabe (engl. Input) die Bauleistung (engl. Output) zu erfüllen [Kir-2012] (siehe Abbildung 2-2).

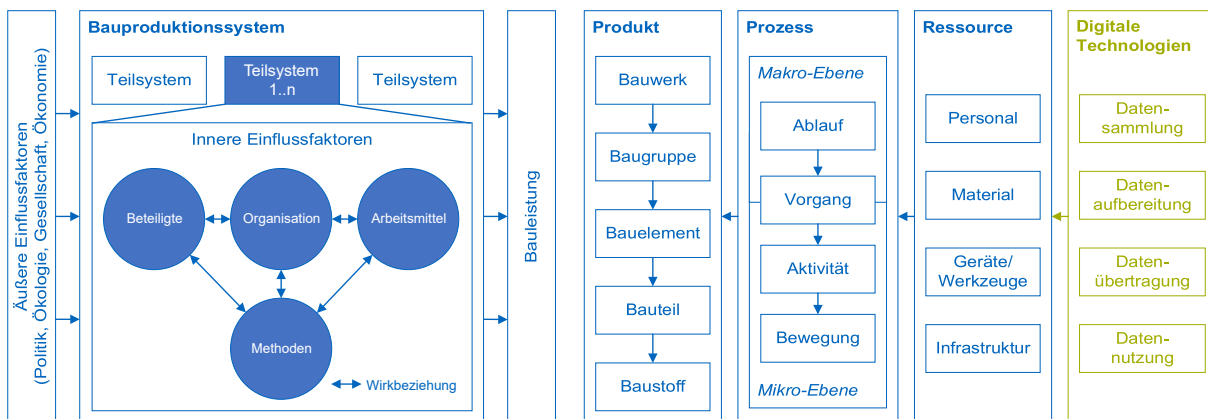


Abbildung 2-2: Bauproduktionssystem (blau), ergänzt um digitale Technologien (grün) (eigene Darstellung nach [Kir-2012])

Das Ergebnis der Bauaufgabe wird als *Bauleistung* bezeichnet. Sie wird im Leistungsverzeichnis beschrieben. Die Bauaufgabe hat damit einen Produkt- und einen Prozesscharakter [Gir-2006, S. XXXII]. Elemente weisen bestimmte Eigenschaften auf, z. B. ob ein Pfahl für eine Tiefgründung bewehrt oder unbewehrt ist. Zwischen den Elementen besteht eine Beziehung, die durch die Bauverfahren beschrieben wird [Fie-1991, S. 28], z. B. kann das Betonieren des Pfahls erst nach der Herstellung des Bohrlochs erfolgen. Es wirken externe und interne Einflüsse auf die Teilsysteme bzw. das gesamte Bauproduktionssystem. Zu den externen Einflüssen zählen z. B. ökologische, politische oder soziale Faktoren (siehe Kapitel 1). Zu den internen Einflüssen zählen die vier Produktionsfaktoren: (1) Mensch, (2) Organisation, (3) Arbeitsmittel und (4) Methoden. Auf die ergänzenden digitalen Technologien als Basis für den Digitalen Zwilling wird im nächsten Abschnitt 2.2 näher eingegangen.

Produkt

Das Produkt wird durch seine Teile definiert. Beispiele für Produktmerkmale sind z. B. Funktionalität, Konfiguration und Geometrie. Das Produkt durchläuft verschiedene Produktionsstufen der Fertigung vom Baustoff, Bauteil, Bauelement bis zum eigentlichen Bauwerk (siehe Abbildung 2-2). Im Spezialtiefbau sind das z. B. Beton, Pfahl, Pfahlwand oder Tiefgründung. Das *Bauprodukt* ist somit das Ergebnis der Bauaufgabe [Gir-2006, S. XXXI]. Eine

Methode zur Beschreibung von Bauaufgaben als Produkt bzw. Objekt ist Building Information Modeling (BIM) [Koc-2018, S. 32 ff.]. Eine weiterführende Beschreibung zu BIM als digitale Technologie folgt im späteren Abschnitt 2.2.3.

Prozess

Ein Prozess ist ein Zwischenschritt innerhalb der Transformation eines Produkts [Shi-1988]. Er ist aufgeteilt in Subprozesse, die (linear) voneinander abhängen [Kos-2000, S. 42]. Hierarchisch lassen sich diese Subprozesse in eine Makro- und Mikro-Ebene einteilen (siehe Abbildung 2-2).

Lean Construction beschreibt die Erstellung des Produkts aus all seinen Teilen, d. h. den Produktionsprozess, als „Wertstrom“ [Arn-2009]. Der *Wertstrom* ist Teil des Gesamtprozesses und besteht selbst aus einzelnen Vorgängen, die sich wiederum aus Tätigkeiten bzw. Aktivitäten zusammensetzen [Fil-2016; Kos-2000; Tom-2000] (siehe Abbildung 2-2). Ein Projektstrukturplan (engl. Work-Breakdown-Structure) hilft dabei, den Prozess zu untergliedern und die Reihenfolge zu bestimmen [Bal-2000]. Ein Ablauf bzw. Vorgang bezieht sich auf die Ausführung verschiedener Aktivitäten (engl. Operation) von Ressourcen (Gewerke inkl. Geräte) in einer bestimmten Abfolge, die selbst wiederum Bewegungen (engl. Therbligs) ausführen.

Aktivitäten können wertschöpfend oder nicht-wertschöpfend sein. *Wertschöpfend* sind alle Aktivitäten, die an der Umsetzung des eigentlichen Ziels beteiligt sind. *Nicht-wertschöpfend* sind arbeitsfreie Zeiten, geplante Ausfallzeiten, z. B. Tanken, Ölwechsel, Umsetzzeiten, An- oder Abfahrt. Das Hauptziel von Lean Construction ist die Verschwendung (nicht-wertschöpfende Aktivitäten) im gesamten Bauprozess zu identifizieren und zu eliminieren [Kos-1992], um einen höheren Wert für die Kund*innen zu generieren [Ala-1997, S. 13]. Nur durch Umwandlung von Aktivitäten entsteht Wertschöpfung. Wichtig ist, dass durch die Eliminierung von Verschwendung, nicht nur die Umwandlung, sondern auch der Fluss verbessert wird. Dieser Ansatz geht auf die Transformation-Flow-Value-Theorie von Koskela [Kos-2000] zurück. Zur Umsetzung eines kontinuierlichen Flusses wird versucht, dass das Material nicht einfach nur bereitgestellt wird (Push-Prinzip), sondern bestmöglich von der nachfolgenden Aktivität abgerufen wird (Pull-Prinzip), um unnötige Puffer und damit Verschwendung zu vermeiden. Ein Beispiel dafür ist das Kanban-System zur bedarfsgerechten Materialversorgung der Produktion wie in einem Supermarkt. Die Lagerbestände direkt an den Produktionslinien sind bewusst gering gehalten. Das Nachfüllen erfolgt durch das Personal der Logistikdienstleistung (LDL) über ein zentrales Großlager in der Produktionsstätte selbst.

Eine bekannte Lean-Methode zur Aufnahme eines Prozesses ist die Wertstromanalyse (engl. Value Stream Mapping). Rother und Shook [Rot-2009] sehen dazu die Begehung

der Produktionsstätte mit Zettel und Stift vor. Diese Vorortaufnahmen werden auch als „Go to Gamba“ bezeichnet. Neben den Aktivitäten werden Material- und Informationsflüsse, d. h. die Richtung des Auslösens einer Materialbewegung, mit Hilfe von standardisierten Symbolen abgebildet und in Beziehung gesetzt. Die Wertstromanalyse ist somit sinnvoll in Kombination mit der Verwendung in einer Simulationsstudie [Sol-2009]. Simulationsspezifische Kenngrößen zu Änderungen von Zuständen, nicht-wertschöpfenden Aktivitäten oder des Ressourceneinsatzes können ergänzt werden [Bai-2020]. Eine weitere standardisierte Darstellungsform, die sich insbesondere auch für die Darstellung von Aktivitäten innerhalb von Bauprozessen eignet [Abd-2017], ist Business Process Modeling Notation (BPMN) nach ISO-Norm 19510 [ISO-19510]. In sogenannten Schwimmbahnen werden Rollen zugeordnet, in der die Vorgänge innerhalb und zwischen Prozessen verdeutlicht werden.

Die Umsetzung von Produktionsstrategien nach Lean-Methoden zeigt Schmenner [Sch-1993] in einer Produkt-Prozess-Matrix, die die Abstimmung zwischen Produkt und Prozess darstellt, d. h. vom Einzelstück bis zum Standardprodukt und vom variablen zum kontinuierlichen Produktfluss. Abweichungen von der Hauptdiagonalen führen zu ineffizientem Ressourceneinsatz und damit zu Verschwendung [Sch-1993], zitiert nach [Har-2020]. Demnach ist die optimale Produktionssteuerung für den Straßenbau mit seinen klar definierten geräteintensiven Vorgängen eine „Fließfertigung durch Maschinen“ (engl. Line Flow) [Har-2020]. Abweichungen zur Realität ergeben sich daraus, dass Projekte häufig noch als Unikatprojekte geplant werden und eine starke Abhängigkeit von Erfahrungen vorherrscht. Die Einführung von standardisierten wiederkehrenden Produkten und Prozessen und die Anpassung des Ressourceneinsatzes können bei gleichzeitiger Berücksichtigung zu einer Verbesserung des Produktionssystems führen. Im Vergleich dazu hat sich in der stationären Produktion, wie etwa bei der Fließbandproduktion (engl. Flow Shop), gezeigt, dass bei einer hohen Anzahl an wiederkehrenden Produkten die einzelnen Vorgänge in derselben Reihenfolge durch spezialisierte Stationen realisiert werden können, um so die Durchlaufzeit zu minimieren [Pin-2009, S. 23].

Die Unterscheidung zwischen verschiedenen Komponenten eines Produktionssystems wird für eine bausteinbasierte katalogisierte Modellierung verwendet. In der fertigenden Industrie ist diese Art der Unterscheidung auch unter dem Begriff Produkt-Prozess-Ressourcen-Modell bekannt [VDI-3682]. Als Beispiel nennt Nielsen [Nie-2003] den Elektromotor (Produkt), der aus verschiedenen Bauteilen (Produktstruktur) besteht, die jeweils aus verschiedenen, teilweise auch gleichen, Vorgängen (Prozesskatalog) gefertigt werden. Diese Vorgänge können von bestimmten Bearbeitungsstationen ausgeführt werden (Ressourcenkatalog). Günthner und Borrmann [Gün-2011, S. 182] greifen die Zusammenhänge von Produkt und Prozess auf, um Bausteine für Bauverfahren zu generieren, z. B. impliziert die Bauaufgabe Brücke (Produkt) ihre Errichtung (Prozess) mit Hilfe von Ortbeton (Methode). Diese Aufschlüsselung ist für jede Detailtiefe denkbar und stellt so gleichzeitig eine Prozessreihenfolge dar.

Sind eindeutige Bauabschnitte bestimmbar und liegen repetitive Aufgaben darin vor, bietet sich die Taktarbeit bzw. *Taktplanung und -steuerung* an. Der Taktplan gibt einen strukturierten Überblick über die Aufgaben der Arbeitsgruppen oder Maschinen, die in einem bestimmten Zeitraum und Arbeits- bzw. Taktbereich in einer bestimmten Bauphase durchgeführt werden. Die Taktplanung und -steuerung kommt aus dem Innenausbau von Hochbauprojekten. Sie wird mit einem Zug, dem Gewerkezug („Parade of Trades“ [Tom-1999]), verglichen [Bin-2018]. Ein Waggon des Zugs entspricht den Aufgaben eines Gewerks, die in einem Taktbereich ausgeführt werden müssen. Die Länge des Waggons entspricht der *Taktzeit*. Sie ist die Dauer eines Teilvorgangs. Bei der Ermittlung der Taktzeit ist die Einarbeitungs- oder Anlaufzeit zu berücksichtigen, d. h. dass sich die Dauern von Vorgängen über die Zeit durch Routine verkürzen. Die Taktzeit ergibt sich aus dem „kritischen Zwangspunkt“, welcher von bestimmten Geräten oder Arbeitskräften ausgeht [Bau-2007, S. 573]. Diese Ressourcen führen dann den *Leitprozess* aus. Er liegt auf dem *kritischen Pfad*, d. h. es gibt keine Pufferzeit und eine Verzögerung führt zu einer Überschreitung der Bauzeit.

Ressource

Neben Produkten und Prozessen bilden *Ressourcen* die dritte Komponente, die in einem Bauproduktionssystem zu berücksichtigen ist [Vog-2021] (siehe Abbildung 2-2). Die Ressource bestimmt die Dauer der Aktivität, die sogenannte Produktionsrate. Sie kann als deterministisch oder stochastisch beschrieben werden. Eine Ressource ist dabei ein Arbeitsmittel zur Durchführung eines Bauprozesses, z. B. Personal, Material, Geräte oder Werkzeuge sowie Infrastruktur wie Puffer oder Raum [Hor-2014, S. 21; Kra-2005, S. 18 f.; Voi-2014, S. 19 ff.].

Innerhalb der operativen Baulogistik ist mit den *personellen Ressourcen* das Personal der ausführenden Unternehmen, der Gewerke, gemeint. Erfolgt die Aufteilung in Gruppen, wird im Rohbau von Kolonnen, im Innenausbau von Arbeitsgruppen gesprochen. Eine Aufteilung nach Produktion oder Logistik ist nicht zwingend [Voi-2014, S. 36].

Materialressourcen sind Baustoffe, Bauelemente (Fertigteile, Module), Bauhilfsstoffe (Schalung und Rüstung), Betriebsstoffe (Druckluft, Treib- und Schmierstoffe) und Medien (Strom, Wasser) [Fra-2011, S. 48]. Materialien werden in Einheiten zum Liefern, Transportieren, Lagern, Kontrollieren und Bereitstellen im Arbeitsbereich als Ladeeinheiten zusammengefasst [Fie-1991, S. 66]. Zu den Ladeeinheiten zählen demnach Pakete (Umschnürung), Paletten (tragender Untersatz, genormt/nicht genormt, Mehrweg-/Einweg) oder Container (Behältnis). Bei der eigentlichen Produktion entsteht Abfall durch das Entfernen von Materialien, z. B. durch Abbrüche, Lösearbeiten im Boden oder durch den Einbau der Materialien, z. B. durch das Zuschneiden von Gipsbetonplatten oder durch das Verflechten von Bewehrungskörben. Die Logistik selbst produziert Abfall, im Transport und im Umschlag der Materialien

(Transport-, Um- und Verpackung). Die Sortierung der anfallenden Baureststoffe und Verpackungen erfolgt in (sortenreinen) Abfallfraktionen. Im Hochbau ist das die Trennung in Holz, mineralischem Bauschutt, Gips, Metallen, Papier, Kunststoff und Baumisch [Lip-1999]. Die für die Entsorgung vorgesehenen Behältnisse, wie Tonnen oder Container, werden auch Entsorgungsmittel genannt.

Geräteressourcen werden für die Bauproduktion und/oder -logistik benötigt. Geräte, vom Bagger über das Transportfahrzeug bis hin zum Gabelstapler, sind in der Baugeräteliste [HDB-2015] mit wirtschaftlichen und technischen Daten hinterlegt und klassifiziert. Mehrere Geräte kommen in Flotten vor. Sind in der Flotte Geräte verschiedener Herstellerfirmen vorhanden, wird von einer gemischten Flotte gesprochen. Im bauspezifischen Kontext verschwimmen die Begriffe von Geräten und Maschinen [Kön-2014]. Grund dafür sind etablierte Sprachgebräuche aus der Praxis. Generell sind Geräte Gegenstände, mit denen Arbeit ausgeführt werden kann. Es wird zwischen mobilen Groß- und Kleingeräten sowie stationären Anlagen unterschieden. Dabei zählen Kleingeräte und Werkzeuge nach dem Einkommensteuergesetz in § 6 Absatz 2 Satz 1, 2 und 4 zu den geringwertigen Wirtschaftsgütern. In der Baugeräteliste [HDB-2015] sind sie unter Verschleißteile aufgelistet. Bestimmte Anlagen und Geräte benötigen Personal zur Bedienung. Die Voraussetzungen, eine Anlage oder ein Gerät führen zu dürfen, variieren und sind damit gleichzeitig ein Einflussfaktor auf die Produktion und den Materialfluss.

Die logistischen Hilfsmittel im Innenausbau sind unterteilt in vertikale und horizontale Transporthilfsmittel (THM) [Gir-2010, S. 331]. Zu den vertikalen THMs gehören Krane und Aufzüge, die für die Ver- und Entsorgung der Produktionsstätten (Geschosse und Räume) mit Materialien und den Personentransport genutzt werden. Krane sind flexibel in der Nutzung. Das Gewicht und der Flächenbedarf bei den Transportgütern ist weniger beschränkt als bei Aufzügen. Allerdings ist die Bedienung durch Kranführende erforderlich. Krane werden daher häufig geteilt, z. B. mit dem Rohbau. Beim Transport mit Hilfe des Krans wird das Material über eine Schiebebühne von Außen in die Geschosse verbracht [Bau-2007, S. 497]. Bei den Aufzügen gibt es Außen- und Innenaufzüge. Außenaufzüge sind meist temporäre Lastenaufzüge. Bei den Innenaufzügen handelt es sich meist um die Nutzung der späteren Personen- oder Lastenaufzüge im Betrieb der Gebäude. Für den Horizontaltransport im Geschoss kommen Gabelstapler oder Handgabelhubwagen zum Einsatz. Die Entladung der LKWs und die Zwischenlagerung im Materiallager erfolgt mit Hilfe von schwereren Geräten, z. B. Radlader, Teleskoplader, Gabelstapler. Der Transport von Materialien und Abfällen, kurz Transportgüter (TGs), erfolgt mit Hilfe von Paletten oder Behältern, sogenannten Ladefähigkeitsmitteln (LHMs) und Entsorgungshilfsmittel (EHM), in bestimmten Transporteinheiten (TEs) [Fot-2022, S. 4-113f]. Im Hochbau wird anstelle von LHMs von Gebinden gesprochen. Aus Gründen der Einheitlichkeit wird auf diesen Begriff im Folgenden verzichtet.

Räumliche Ressourcen werden für die Bauproduktion und / oder -logistik benötigt. Bauproduktionsflächen sind z. B. Arbeitsraum, Aufstell-, bzw. Rüstflächen oder Sicherheitsbereiche.

Logistikflächen sind z. B. Entlade- und Abladezonen, Lager-/Pufferflächen, Transportwege oder Vorhaltungen für die Baustelleneinrichtung. Zu letzterem zählen z. B. Toiletten, Wohncontainer, Zäune oder Ampeln. Geräte bieten Ladeflächen, z. B. das Füllvolumen eines Containers oder der Schaufelinhalt eines Radladers [Voi-2014].

Einflussfaktoren

Die unterschiedlichen Bauverfahren weisen dominierende Ressourcen auf, deren Einflussfaktoren den Produktionsfluss bestimmen [Bau-2007, S. 21 ff.]. Der Erdbau ist maschinenintensiv. Er setzt schwere Geräte ein, um die Teilvorgänge (Lösen, Laden, Transportieren, Einbauen und Verdichten) auszuführen. Sie sind taktgebend für die Fließproduktion. Einflussfaktoren einer ungestörten Produktion sind u. a. Witterung, Geräteführende oder Betriebsstoffe.

Im Fertigteilbau sind die Maschinen und Anlagen dominierend. Durch die stationäre serielle Produktion können viele Einflussfaktoren, wie Witterung und Unikatcharakter, eingedämmt werden. Dafür haben die Planung der Sequenzierung der Elemente vorab sowie die Logistik beim Zusammenbau vor Ort einen höheren Einfluss.

Im Rohbau ist der Maschineneinsatz geringer. Krane, Fahrmischer und Betonpumpen sind im Einsatz. Dafür ist der Personeneinsatz durch Kolonnen (Schalungs-, Bewehrungs-, Betonkolonnen) höher. Taktgebend ist der Schalungseinsatz. Einflussfaktoren einer ungestörten Produktion sind u. a. die rechtzeitige Bereitstellung von Plänen oder von Baustoffen und deren Hilfsstoffe durch Lieferanten.

Im Innenausbau ist das Personal dominierend. Das Personal der Gewerke und der LDL ist in Arbeitsgruppen von Nachunternehmen organisiert und nur mit wenigen, leichten Geräten und Werkzeugen ausgestattet. Die Koordination und Logistik der Personen- und Materialflüsse nimmt einen höheren Stellenwert ein.

2.2 Gestaltung von Digitalen Zwillingen

2.2.1 Begriffe und Definitionen

Digitale Zwillinge wurden bereits Anfang der Nullerjahre des 21. Jahrhunderts eingeführt [Gri-2016, S. 93]. Im Kontext der amerikanischen Bundesbehörde für Raumfahrt und Flugwissenschaft wurde mit dem Begriff erstmals ein Paradigmenwechsel eingeleitet und zur langfristigen strategischen Anwendung gebracht [Pia-2010]. Ziel war, die Bedingungen eines Raumfahrzeugs während seiner Mission im All auf der Erde widerzuspiegeln, um mehr Sicherheit und Zuverlässigkeit zu ermöglichen [Gla-2012; Tue-2011].

Heute existieren viele verschiedene Definitionen und Begrifflichkeiten im Zusammenhang mit dem Digitalen Zwilling [Per-2022; Tra-2020a; Vog-2024].

Dabei ist zunächst zwischen zwei englischen Begriffen der Digitalisierung zu unterscheiden: Digitization und Digitalization [Ver-2021]. „Digitization“ beschreibt die reine Umwandlung analoger Informationen in ein maschinenlesbares Format. Das umschließt die Sensorik im physischen System sowie die digitalen Modelle im digitalen System. „Digitalization“ ist die Nutzung der Daten und Informationen zur Verbesserung von Geschäftsprozessen. Dazu gehört der Digitale Zwilling. Plattformen dienen zur Bereitstellung von digitalen Modellen und Informationen aus dem physischen System. Die Überführung in Geschäftsmodelle und die Gesellschaft wird als Digitale Transformation (engl. Digital Transformation) bezeichnet [Ola-2021].

Vogel-Heuser et al. [Vog-2024] sammeln mehr als 50 Definitionen aus sieben Bereichen: (1) Umwelt, (2) Maschinen- und Anlagenbau, (3) technische Produktentwicklung, (4) Produktion, (5) Produktionsprozess, (6) Ergonomie und (7) Logistik für innerbetriebliche Systeme und den Bau. Daraus leiten sie die nachfolgende umfassende Definition für den Digitalen Zwilling ab.

Definition: Digitaler Zwilling

Digitale Zwillinge sind definiert als **dynamische digitale Repräsentationen** bestimmter realer Entitäten, die aus (miteinander verknüpften) Komponenten und Schnittstellen mit anwendungsspezifischen Merkmalen und Größen (z. B. Zeit, Größe, Genauigkeit, Hierarchie, Lebenszyklusphase) bestehen. Ziel des Digitalen Zwillings ist die **Optimierung des realen Systems**. [Vog-2024]

Eine Entität ist dabei nach der DIN-Norm SPEC 91345 [DIN-91345] ein eindeutig identifizierbarer Gegenstand aus dem System.

Trauer et al. [Tra-2020a] weisen auf weitere Begriffe aus der englischsprachigen Literatur hin, wie dem „Digital Blueprint“ (z. B. in [Baj-2016]), dem „Digital Mirror Model“ (z. B. in [Eri-2017]), der „Digital Reflection“ (z. B. in [Eri-2017]) oder dem „Dynamic Data Driven Application System“ (z. B. in [Baz-2015]).

Die Komponenten des Digitalen Zwillings sind:

- digitale Repräsentation;
- physische Entität;
- Datenschnittstelle zur physischen Entität;
- Komponenten zur Verarbeitung der Daten;
- Variablen und Parameter als Ergebnis für die Entscheidungsunterstützung [Tao-2018] (siehe Abbildung 2-3).

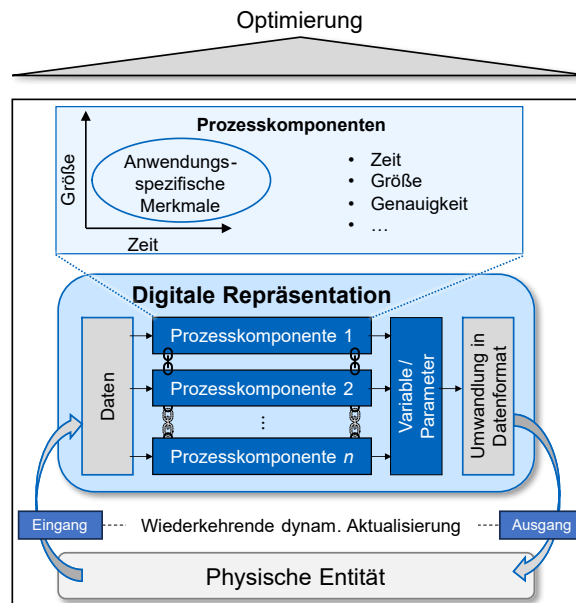


Abbildung 2-3: Konzeptionelle Struktur des Digitalen Zwillings (eigene Darstellung nach [Vog-2024])

Der Austausch der Daten zwischen der digitalen Repräsentation und der physischen Entität erfolgt über ihre Schnittstellen. Sie sind abhängig von den Komponenten der digitalen Repräsentation. Die Komponenten bilden das Digitale Modell, d. h. eine Visualisierung von Daten, ein physikalisch basiertes Modell oder Simulationen für Vorhersagen. Das Digitale Modell kann aus mehreren Komponenten bestehen, die wiederum miteinander vernetzt sind. Dieses Digitale Modell erzeugt Ausgangsgrößen in Form von Parametern und Variablen, die zur Optimierung des realen Systems verwendet werden können [Sch-2020b].

Kritzinger et al. [Kri-2018] beschreiben die Evolution des Digitalen Zwillings mit dem Grad der Integration zwischen dem digitalen und dem physischen Modell vom Digitalen Modell über den Digitalen Schatten zum Digitalen Zwilling. Das *Digitale Modell* ist die digitale Repräsentation des physischen Systems. Es besteht keine digitale Verbindung zwischen den beiden. Die Integration von Eingangs- und Ausgangsgrößen erfolgt manuell. Der *Digitale Schatten* beschreibt die automatisierte unidirektionale Integration von Daten des realen Systems in das Digitale Modell. Durch diese unidirektionale digitale Verbindung führt eine Änderung im physischen System zu einer Änderung im Digitalen Modell. Die rückwirkende Änderung aus dem Digitalen Modell bleibt weiterhin manuell. Der *Digitale Zwilling* als solches ermöglicht dann eine bidirektionale Kommunikation zwischen den Modellen, um einerseits reale Daten zu nutzen und andererseits das reale Modell direkt zu beeinflussen (siehe Abbildung 1-1 (graue Blockpfeile)).

Der Digitale Zwilling kann als System betrachtet werden, neben dem weitere Digitale Zwillinge vorherrschen können, so genannte „Digital Twin Aggregated“, die zusammen ein „Digital Twin Environment“ bilden [Gri-2016; Son-2019]. Ein Digitaler Zwilling ist demnach Teil eines Cyber-physischen Systems [Aka-2015; Per-2022]. Dieses System „verknüpft reale (physikalische)

Objekte und Prozesse mit informationsverarbeitenden (virtuellen) Objekten und Prozessen über offene, teilweise globale und jederzeit miteinander verbundene Informationsnetze“ [VDI-2021]. Eine gängige Beschreibung für Cyber-physische Systeme ist daher auch ein „System von Systemen“ [Kha-2015].

Die Vernetzung verschiedener physischer Objekte impliziert einen zunehmenden Standardisierungsaufwand [Bra-2011]. Industrie 4.0 hat dafür mit dem Referenzarchitekturmodell der Industrie 4.0, kurz RAMI 4.0, einen standardisierten und einheitlichen konzeptionellen Rahmen geschaffen [DIN-91345]. Die physische Entität entspricht der Anlagenschicht (engl. Asset). Zusammen mit den eingebetteten Systemen bilden sie die unterste Schicht in RAMI 4.0. Der Datenaustausch erfolgt in der darüberliegenden Integrationsschicht, die Kommunikation über die wiederum darüberliegende Kommunikationsschicht. Das eigentliche Ziel der Optimierung wird in der zweithöchsten Schicht, der Funktionsschicht, verfolgt. Die strategische unternehmensübergreifende Entscheidungsfindung findet in der obersten Geschäftsschicht statt. Abbildung 2-4 setzt die Definition des Digitalen Zwillings in diesen Rahmen.

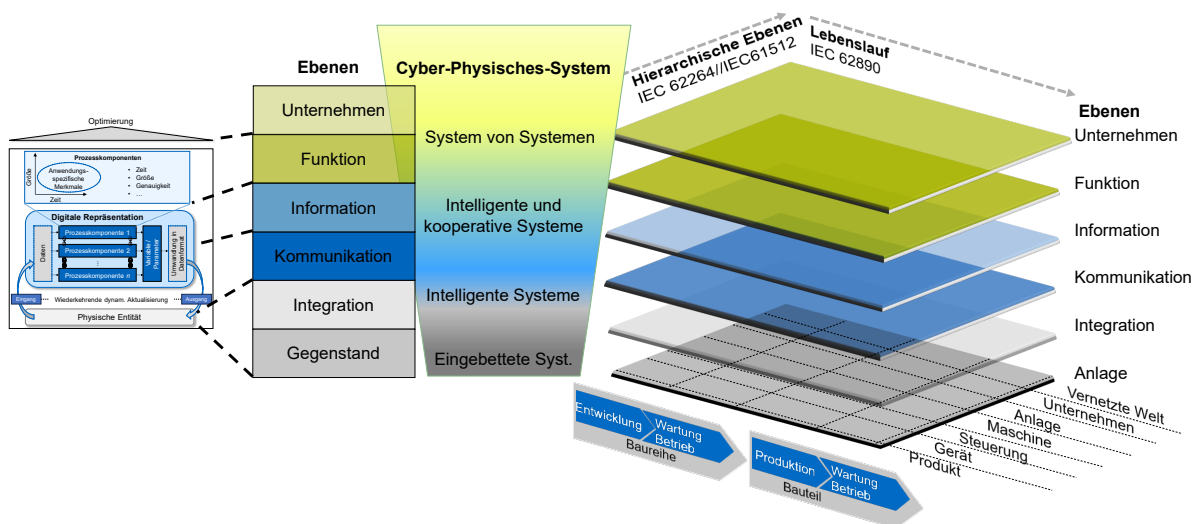


Abbildung 2-4: Integration des Digitalen Zwillings in RAMI 4.0 (eigene Darstellung nach [Vog-2024] zitiert nach [Bro-2010; DIN-91345; Mel-2023])

Unterschiede ergeben sich aus den Anwendungen bzw. der zu optimierenden physischen Entität und ihrer dafür vorgesehenen digitalen Repräsentation [Tra-2020a; Vog-2024]: Von der Betrachtung von Maschinen über Produkte [Bal-2017; Bou-2017; Tao-2019] bis hin zu Anlagen [Ban-2017; Kas-2017; Sta-2018], Systemen [Lee-2017], Dienstleistungen [Kuh-2017] und Menschen [Rud-2022]. Von dieser Betrachtungsweise leitet sich auch die Anforderung an die Datenschnittstellen und Komponenten der digitalen Repräsentation ab.

Die Simulation ist dabei die am häufigsten verwendete digitale Technologie und damit ein Schlüsselaspekt für die Repräsentation des Digitalen Zwillings [Bos-2016; Kuh-2017]. Durch den Abgleich mit Daten aus dem realen System wird die Simulation aufgewertet:

Leistungen können überwacht, optimiert und Abweichungen erkannt werden, um letztlich als Entscheidungsunterstützung zu dienen [Bos-2016; Sch-2016; Tra-2020b]. Der Abgleich der Daten ist dabei nicht für jedes Anwendungsbeispiel gleich ausgereift oder im gleichen Maße ausgeprägt und damit anzustreben, womit diese Arbeit von spezifischeren Begrifflichkeiten zum Digitalen Zwilling, wie der Arbeit von Trauer et al. [Tra-2020b] mit seiner Differenzierung zur Ausprägung der Kommunikation mit dem Digitalen Modell oder Schatten, absieht.

2.2.2 Übertragung auf die Bauindustrie

Auch für die Bauwirtschaft zeigen sich große Potenziale für den Lebenszyklus eines Bauwerks und dessen Prozesse [Ful-2020; Vog-2024]. Digitale Zwillinge in der Bauwirtschaft können Verbesserungen in der Projektvisualisierung und -planung, der Bauüberwachung und -steuerung, der Zusammenarbeit und Kommunikation, dem Sicherheits- und Risikomanagement, dem Gebäude- und Lieferkettenmanagement und der Wartung sowie der datengestützten Leistungsanalyse und -optimierung bewirken [Bor-2024; Omr-2023]. Diese Verbesserungen können sich positiv auf die Kosten des Bauprojekts, die Zeit zum Erreichen der Bauaufgabe, die Qualität der Bauleistung, die Sicherheit der Bauarbeitenden sowie auf die Verringerung der Emissionen durch Lärm oder Abgase und damit auf die Einhaltung der Klimaziele auswirken [Sac-2020].

Digitale Zwillinge in der Bauindustrie sind noch nicht weit vorangeschritten [Mad-2022]. Die hohe Komplexität und Volatilität durch die bauspezifischen Randbedingungen (siehe Tabelle 1-1), erschweren die Digitalisierung und damit die Einführung von Digitalen Zwillingen. Um dem entgegenzuwirken, hat sich im Hochbau mit BIM eine standardisierte digitale Beschreibung von Bauobjekten etabliert [Bui-2022]. BIM wird im Zuge der Planung, aber auch Ausführung, mit tatsächlichen Daten aktualisiert. Damit wird in der Bauwirtschaft BIM dem Digitalen Zwilling gleichgesetzt [Boj-2020]. Dieser Digitale Bauzwilling (engl. Construction Digital Twin) nach Boje et al. [Boj-2020] konzentriert sich in erster Linie auf die digitalen Technologien zur Repräsentation von Gebäuden. Für Feng et al. [Fen-2021] wird BIM zum Digitalen Zwilling durch die Verbindung von Daten und Simulationen verschiedener Art, um damit Vorhersagen abzuleiten. Auch Sacks et al. [Sac-2020] erweitern den Ansatz von BIM auf die Notwendigkeit eines Vorgehensmodells, nicht nur für Gebäude, sondern auch für deren Bauprozesse [Sac-2020]. Sie führen daher den Begriff des Digitalen Zwillings im Bauwesen (engl. Digital Twin in Construction) ein.

Definition: Digitaler Zwilling im Bauwesen

Im Bauwesen ist der Digitale Zwilling ein **Vorgehensmodell** zum Einsatz von digitalen Technologien in Planung und Ausführung zur Überwachung und Optimierung von Bauaktivitäten mit Hilfe von digitalen Repräsentationen. [Sac-2020]

Feng et al. [Fen-2021] halten fest, dass verschiedene Methoden erforderlich sind, um die Anforderungen unterschiedlicher Anwendungsbereiche abzudecken, die sich an der Anwendung des Digitalen Zwillings orientieren. Sie leiten aus einer systematischen Literaturrecherche fünf Schritte zur Einführung und Nutzung von Digitalen Zwillingen ab: (1) Datenerfassung zur Sammlung und Weiterverarbeitung von Daten, (2) Datenübertragung zur bidirektionalen Bereitstellung der Daten, (3) Datenmodellierung zur digitalen Abbildung des physischen Systems, (4) Datenintegration zur Bereitstellung und Verwaltung von Daten und (5) Nutzung zur Entscheidungsfindung auf Basis der Daten.

Für die Anwendung in der Baulogistik liegt der Fokus dieser Arbeit auf Daten aus dem Bauprozess zur Simulation des Materialflusses. Die Definition von *Daten* orientiert sich dabei am Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation als die Aufzeichnung von *Informationen* [REF-1991, S. 162], zitiert nach [Ott-2007, S. 36]. In Anlehnung an die vorhandenen Vorgehensmodelle bei Simulationsstudien, z. B. von Rabe et al. [Rab-2008], werden im Folgenden die beiden Begriffe Datensammlung und -aufbereitung getrennt betrachtet und der Bezug zum Bauprozess hergestellt. Ebenso werden die Datenmodellierung, -integration und -nutzung komprimiert als Datennutzung in der Simulation zusammengefasst. Somit leiten sich die folgenden vier Bausteine für das Vorgehensmodell dieser Arbeit ab:

1. **Datensammlung** von (Roh-)Daten während der Planung oder Ausführung [Rab-2008, S. 86];
2. **Datenaufbereitung** von Daten in nutzbare Informationen;
3. **Datenübertragung** zur (bi-)direktionalen Bereitstellung der Daten und Informationen;
4. **Datennutzung**, bestehend aus Modellierung der digitalen Repräsentation, Implementierung und Durchführung von Parameterstudien zur Entscheidungsunterstützung.

2.2.3 Eingesetzte digitale Technologien

Im Folgenden wird auf die vorherrschenden digitalen Technologien zur Umsetzung von Digitalen Zwillingen in der Bauindustrie eingegangen (siehe Tabelle 2-1).

Datensammlung mit Tracking and Tracing zur Lokalisierung und Identifikation

Tracking and Tracing (TaT) ist ein Sammelbegriff für digitale Technologien zur Lokalisierung und Identifikation von Ressourcen wie z. B. Materialien, Geräten oder Personal (siehe orangene Symbole in Abbildung 2-5). Die Abgrenzung zu anderen digitalen Technologien und Werkzeugen erfolgt über diesen spezifischen Anwendungsbereich. Er reicht von der Bestandsaufnahme über die Nachverfolgung bis hin zur Disposition von Geräten und Materialien [Bec-2023, S. ff.181]. Die Auswahl an geeigneten Werkzeugen ist dabei abhängig von der Wertigkeit des Materialflusses und der Komplexität der Anwendung, wobei das Potenzial in der Reduzierung nicht-wertschöpfender Tätigkeiten liegt, die einen signifikanten Anteil

Tabelle 2-1: *Digitale Technologien und Werkzeuge von Digitalen Zwillingen im Bauwesen (hervorgehoben: relevante Technologien; eigene Darstellung nach [Fen-2021; Oes-2016; Tuh-2023])*

	Digitale Technologien	Beispielhafte Werkzeuge
Datensammlung	Tracking and Tracing	Lokalisierung (GPS, RFID , Kamerasystem), Identifikation (Avisierung , QR-/Barcode, RFID)
	Sensorsysteme	Optik (Kamerasystem, Laser), Audio (Mikrofon), Bewegungen (IMU), Kräfte (Drucksensoren)
Datenaufbereitung	Künstliche Intelligenz	Symbolische KI, ML (NB, SVM, kNN, DT), DL (ANN, RNN, CNN)
Datenübertragung	Funkverfahren	Nahbereich (NFC, RFID, Bluetooth, UWB, WLAN), Weitbereich (LoRa, Mobilfunk)
	Middleware-Systeme	Architekturen (DDS, MQTT, SOA, MSA), Kommunikation (TCP, HTTP, REST-API)
Datennutzung	Informationssysteme	ERP, SQL-Datenbank, internetbasierte Plattformen (Flottenverwaltung, Avisierung)
	Digitale Modelle	BIM , GIS
	Simulation	DES, Finite-Elemente-Methode

der Arbeitszeit in Anspruch nehmen, wie z. B. die Disposition [Chr-2015, S. 100]. Erfolgt die Datenübertragung über das Internet, sind sie digitale Technologien aus dem Bereich IoT, organisiert in Plattformen (siehe Abschnitt 2.2.3).

Die Identifikation beginnt am Anfang der Versorgungskette bei der Anforderung der Ressourcen [Kla-2008, S. 569]. Bei der Materialbestellung wird von der **Avisierung** gesprochen. Die Avisierung umfasst die Anmeldung der benötigten Materialien über das Internet. Sie ist die Schnittstelle zwischen dem operativen Bereich auf der Baustelle und dem Einkauf. Die bestellten Materialien erhalten eine eindeutige Identifikation für die weitere Verfolgung des Bestell- und Lieferprozesses z. B. mit Hilfe von optischen Datenträgern wie **QR**- (engl. Quick Response) oder **Barcodes** (dt. Strich- oder Balkencodes). Die Datenübertragung kann wiederum über bekannte Funkverfahren, meist organisiert in Plattformen, erfolgen (siehe Abschnitt 2.2.3).

Eine TaT-Technologie, die sowohl zur Lokalisierung als auch zur Identifikation eingesetzt wird, ist **RFID**. Im Gegensatz zu GPS (engl. Global Positioning System), das auf Satellitendaten zurückgreift, ist RFID besonders für den Einsatz in Innenräumen geeignet [Li-2011]. RFID kommt in Systemen vor, bestehend aus elektronischen Etiketten (engl. Tags) und Lesegeräten (engl. Reader) [Li-2011]. Beide Komponenten haben Antennen. Das zu identifizierende Objekt wird mit einem Tag bestückt. Sobald das Objekt mit dem Tag in Reichweite

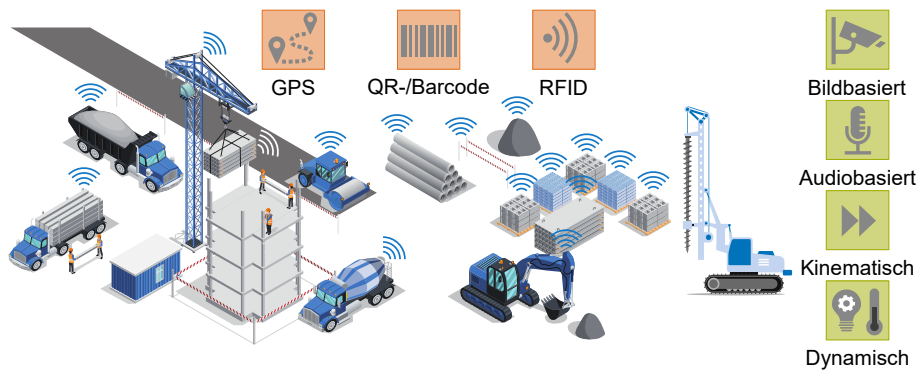


Abbildung 2-5: Schematische Darstellung verschiedener TaT- und Sensorsysteme zur Datensammlung (eigene Darstellung)

der Antenne ist, wird ein Signal erzeugt. Das Signal wird über elektromagnetische Felder an das verbundene Lesegerät übertragen. Abhängig von der Energiequelle wird zwischen zwei Arten von Tags unterschieden: Passiv und aktiv [Li-2011]. Passive Tags nutzen die Energie aus dem ausgesendeten elektromagnetischen Feld des Lesegeräts. Durch den Eintritt in das Feld verändert der Tag die elektrische Last, was ein Signal erzeugt. Aktive Tags verfügen über eine eigene verbaute Energiequelle. Semi-passive Tags senden nur innerhalb der Reichweite des elektromagnetischen Feldes des Lesegeräts. Der Vorteil von aktiven oder semi-passiven Tags ist die größere Lesereichweite. Weitere Vorteile sind zusätzlich eingebaute Speicher-, Erfassungs- und Verarbeitungskapazitäten.

Datensammlung mit Sensorsystemen zur Aktivitätserkennung

Sensoren ermöglichen die Erfassung vielfältiger und detaillierter Daten zum inneren Zustand eines Geräts oder zu dessen Umgebung [Fot-2023]. Für die automatisierte Erfassung des Baufortschritts werden die Sensoren nach Sherafat et al. [She-2020] in verschiedene Klassen eingeteilt, wobei die vierte Klasse durch die Arbeiten der Autorin ergänzt wird (siehe grüne Symbole in Abbildung 2-5):

- **Bildbasiert**, z. B. Laserscanning [Bre-2021], Videokameras [Büg-2014; Gol-2013; Pan-2023a];
- **Audiobasiert**, z. B. Mikrofone [Che-2019];
- **Kinematisch**, z. B. GPS [Akh-2013; Akh-2014; Beh-2015; Mon-2014; Son-2012], IMUs [Ras-2020]
- **Dynamisch**, z. B. (pneumatische) Drucksensoren [Fis-2021b; Fis-2021c; Fis-2023a].

Golparvar-Fard et al. [Gol-2013], Bügler et al. [Büg-2014] oder Panahi et al. [Pan-2023a] nutzen Kamerasysteme zur Aktivitätserkennung von Geräten bei der Erdbewegung bzw. von Bearbeitungsstationen beim Zusammenbau von Modulen. Bügler et al. [Büg-2014; Büg-2016; Büg-2017] zeigen an einem Beispiel aus dem (Spezial-)Tiefbau zur Pfahlwandherstellung

und anschließendem Baugrubenaushub den Einsatz von Kameras. Mit Hilfe von Videoanalyse und Photogrammetrie konnten die Aktivitäten der Geräte und damit deren Auslastung gemessen werden, sowie auch das ausgehobene Erdvolumen der Baugrube.

Akhavian und Behzadan [Akh-2013] legen um Geräte und Fahrzeuge für die Erdbewegung einen bestimmten Bereich, den so genannten Geofence, mit Hilfe von GPS-Daten fest. Sobald sich ihre Bereiche nähern oder sogar überlappen, kann so auf eine Aktivität geschlossen werden, wie das Beladen eines Muldenkippers durch einen Hydraulikbagger oder die Transportzyklen des Muldenkippers.

Ahn et al. [Ahn-2015a] und Akhavian und Behzadan [Akh-2015b] installieren einfache Messsensoren in den Kabinen von Geräten. Ahn et al. [Ahn-2015a] verwenden kostengünstige Beschleunigungsmesser, um darüber Aufschluss über die Aktivität bzw. Inaktivität eines Hydraulikbaggers zu erhalten. Akhavian und Behzadan [Akh-2015b] verwenden Mobiltelefone zur Aufzeichnung von Beschleunigung und Position eines Radladers beim Abtrag und der Entsorgung von Schüttgut. Durch die Identifizierung von Aktivitäten wie „Motor aus“, „Arbeiten“ und „Leerlauf“ können Rückschlüsse auf die Dauer und die Produktivität der Arbeiten gezogen werden. Rashid und Louis [Ras-2020] weisen auf den starken Einfluss der Kabinenschwingungen auf die Messergebnisse und damit auf die Datenauswertung hin. Durch die Anbringung von Beschleunigungs- und Gyroskopsensoren an den einzelnen Gelenken am Ausleger eines Hydraulikbaggers verbessern sie die Aktivitätserkennung durch detaillierte Aufzeichnung der Bewegungen.

In der Literatur stellt die Verwendung von intern verbauten (Druck-)Sensoren für die Aktivitätserkennung eine Forschungslücke dar, z. B. über die gemessenen hydraulischen Drücke oder Seilkräfte [Fis-2021b; Fis-2021c; Fis-2023a]. Die Industrie hat die Aussagekraft dieser Sensorsysteme erkannt. Auf Grundlage des Forschungsprojekts BauFlott [Gün-2016c] konnte über den Verband der Baubranche, Umwelt- und Maschinentechnik e. V. und den amerikanischen Verband namens Association of Equipment Management Professionals mit japanischer Unterstützung die ISO-Norm 15143-3 [ISO-15143-3] geschaffen werden, welche nun den Datenstandard für Telematik von Geräten für die Erdbewegung und den Straßenbau beschreibt. Derzeit strebt der Arbeitskreis „Machines in Construction – MiC 4.0“, in dem auch der Lehrstuhl fml vertreten ist, die Erweiterung dieser Norm auf weitere Baugeräte an. Weiterhin sollen neben den Zustandsdaten auch die Produktionsdaten der Maschinen zusammengetragen werden. Entscheidend hierfür ist der geeignete Einsatz von Sensorik.

Datenaufbereitung mit Künstlicher Intelligenz

Der Begriff Künstliche Intelligenz (KI), der in den 1950er Jahren formuliert wurde, bezieht sich auf die Frage, ob Maschinen „denken“ bzw. intellektuelle Aufgaben von Menschen ausführen können [Tur-1950]. Heute umschließt die Definition des BSI Bundesamt für Sicherheit in der

Informationstechnik [BSI-2023] für KI nicht nur Hardware-, sondern auch Softwaresysteme, die „auf Grundlage von Wahrnehmung und Analyse ihrer Umgebung [...] mit einem gewissen Grad an Autonomie [agieren], um bestimmte Ziele zu erreichen.“

Um diese Ziele zu erreichen, wurden mit der Zeit verschiedene Ansätze entwickelt, z. B. die *symbolische KI* oder das *Maschinelle Lernen (ML)* [Cho-2021]. Die symbolische KI umfasst das explizite Programmieren von *Regeln*, z. B. für einen Schachcomputer. Der Mensch gibt dem System dabei unter Anwendung von Abfolgen und Funktionen einen expliziten Lösungsweg vor. Bei komplexeren unschärferen Problemen reichen diese Regeln alleine nicht mehr aus, z. B. bei Klassifikationsproblemen für die Bild- und Spracherkennung. Bei ML werden diese Probleme gelöst, ohne dafür explizit zu definieren. Der Mensch gibt dem System dabei keine Regeln für einen expliziten Lösungsweg vor, sondern stattdessen Beispiele in Form von *Daten*, die für die Lösung des Problems relevant sind. Mit Hilfe von Algorithmen kann das System selbst Regeln für den Lösungsweg finden. Die Grundlage dieser Algorithmen und deren Ergebnissbewertung gehen zurück auf die Anwendung von Statistik [Sch-2019, S. 93-95].

Die Abgrenzung von ML zur Statistik ist das *Lernen* und damit der Zweck der beiden Methoden. Die Statistik hat zum Ziel Daten darzustellen und zu analysieren, um Erkenntnisse abzuleiten. ML wendet statistische Methoden an, um Daten zu verarbeiten und die Ergebnisse zu testen, um eine genaue Vorhersage oder Entscheidung auf Grundlage der Daten zu treffen.

Es werden vier Methoden unterschieden: (1) Überwachtes Lernen (engl. Supervised Learning), (2) Unüberwachtes Lernen (engl. Unsupervised Learning), (3) Halbüberwachtes Lernen (engl. Semisupervised Learning) und (4) Bestärkendes Lernen (engl. Reinforcement Learning) [Sch-2019, S. 95 ff.; VDM-2018, S. 6]. Letztere unterscheidet sich von den anderen drei Methoden dadurch, dass für die Modellierung keine annotierten bzw. gekennzeichneten Daten verwendet werden.

Anders als beim Überwachten Lernen, beruhen das Unüberwachte, wie auch das Halbüberwachte Lernen (zum Teil), auf nicht expliziten Zielgrößen, d. h. die gesuchte Lösung ist nicht vorgegeben. Es wird daher versucht, durch die Klassifikation (engl. Classification) oder Segmentierung (engl. Segmentation) von Daten zu Erkenntnissen zu gelangen. Bei der Klassifikation sind die Klassen bereits vorgegeben, bei der Segmentierung werden diese erst gefunden [Sch-2019, S. 107 f.]. Ein Beispiel für die Segmentierung ist die Lebenszyklusanalyse von Baugeräteflotten, wie z. B. in [Kar-2021; Liu-2020].

In dieser Arbeit wird die Methode des **Überwachten Lernens** verwendet. Ziel ist, die Aktivitäten eines Geräts zu klassifizieren, um daraus die Dauern der Aktivitäten abzuleiten, die als Eingangsdaten für die Simulation dienen. Beim Überwachten Lernen wird ein Modell aus Erfahrungen erstellt [Sch-2019, S. 95 ff.]. Diese Erfahrungen liegen in Form eines Datensatzes mit bestimmten *Merkmalen* (engl. Features) vor, dessen Datenpunkte bereits in *Kategorien*

(engl. Labels) eingeteilt sind. Die dabei verwendeten Daten entsprechen den *Trainingsdaten*. Sie werden noch einmal in *Testdatensatz* separiert, um die Ergebnisse in der Lern- bzw. Trainingsphase validieren zu können. Die trainierten Modelle werden in der folgenden Anwendungsphase (engl. Model Deployment) als Vorhersagemodelle verwendet, um für neue Eingabedaten die zuvor unbekannten Ausgaben zu bestimmen [Sch-2019, S. 91]. Letztlich findet die Auswahl der Modelle auf Basis ihrer Genauigkeit statt. Entscheidenden Einfluss hat dabei die Robustheit der Modelle gegenüber zu wenigen (Datenmenge) oder zu komplexen Trainings- und Testdaten (Datenqualität). Einfluss auf die Datenqualität haben Merkmale, die irrelevant, redundant oder zueinander abhängig sind, oder Messabweichungen, aufgrund von Rauschen oder Ausreißern, aufweisen.

Der Begriff des Überwachten Lernens umfasst eine Reihe von Methoden, die auf Entscheidungsbäumen (z. B. Decision Tree), auf statistischen (z. B. Logistische Regression) oder probabilistischen Modellierungen (z. B. Naive Bayes) oder auf kernelbasierten Algorithmen (z. B. k-Nearest-Neighbor, Support Vector Machines) basieren. Die **Decision Tree** (DT)-Methode [Bre-1984; Qui-1992] baut Entscheidungsbäume auf, um den Datensatz zu klassifizieren. Jeder Abzweig entspricht der Abfrage einer Regel bzw. eines Attributs. Ziel ist die Verzweigung des Datensatzes, bis alle Datenpunkte nicht weiter aufgeteilt werden können. Die **Logistische Regression** (LR)-Methode basiert auf der Berechnung von Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten einer Klasse. Dabei wird ausgenutzt, dass die logistische Funktion nur Werte zwischen Null und Eins annimmt. Die logistische Funktion sagt aus, wie wahrscheinlich es ist, dass eine Klasse eintritt. Die Parameter für die logistische Funktion werden mit Hilfe des iterativen Maximum-Likelihood-Verfahrens zuvor geschätzt. Die **Naive Bayes** (NB)-Methode ähnelt LR. Im Gegensatz zu LR, geht NB von der „naiven“ Annahme aus, dass alle Merkmale stochastisch unabhängig voneinander sind (Satz von Bayes). Dadurch wird die Menge der zu schätzenden Wahrscheinlichkeiten geringer. Die Schätzung der Parameter erfolgt auch über das Maximum-Likelihood-Verfahren. Bei der **k-Nearest Neighbor** (kNN)-Methode [Cov-1967] findet die Klassifizierung eines Datenpunktes auf Basis der k Datenpunkte mit der kürzesten Distanz statt. Dabei werden über die Distanz die Ähnlichkeit ihrer Merkmale überprüft und entsprechend in Klassen geteilt. Die Datenpunkte werden als Referenz abgespeichert. Ein „Lernen“ findet somit nicht statt, wodurch die Methode auch unter dem Begriff „Lazy Learning“ bekannt ist [Sch-2019, S. 126]. Bei der **Support Vector Machine** (SVM)-Methode [Bos-1992] wird eine trennende Hyperebene zwischen zwei separierbaren Klassen gesucht. Ziel ist, einen maximalen Abstand der Datenpunkte von dieser Ebene zu suchen. Die Punkte, die am nächsten zur Ebene liegen, werden als Stützpunkte bezeichnet. Durch die Skalierung der Merkmale können die Abstände vergrößert werden. SVM geht von einer linearen Hyperebene aus. Ist dies nicht möglich, z. B. aufgrund von Rauschen oder Überlappungen der Klassen, gibt es Ansätze, wie die Kernel-Methode oder das Erlauben von Schlupfvariablen. Die Kernel-Methode ermöglicht das Finden von

nichtlinearen Hyperebenen durch eine Transformation der Stützvektoren. Schlupfvariablen erlauben, dass einzelne Datenpunkte falsch klassifiziert werden, unter der Bedingung, dass die Summe der Fehler minimal ist.

Eine Untergruppe von ML ist *Deep Learning (DL)*. DL zielt darauf ab, Modelle mit hohem Abstraktionsgrad zu formulieren, die sich durch ihre hohe Komplexität bzw. ihre „Tiefe“ auszeichnen, wozu **Künstliche Neuronale Netze** (engl. Artificial Neural Network (ANN)) zählen. ANN-Modelle sind die Abstraktion des neuronalen Nervensystems aus verschiedenen Netzen mit miteinander verknüpften *Neuronen* als Knotenpunkte der Netze (siehe Abbildung 2-6) [Cho-2021; Goo-2016]. Diese Abstraktion wird nach Rosenblatt [Ros-1958] *Perzeptron* genannt. Ein Perzeptron besteht aus einer Eingabeschicht (engl. Input Layer) aus verschiedenen Neuronen x_i mit $i = 1..n$ (blaue Knoten), die mit Hilfe von Gewichtungen w_j , aufsummiert ein Ausgabesignal bzw. -wert y_j ergeben, auch als Ausgabeschicht (engl. Output Layer) bezeichnet (grüner Knoten). Mehrlagige Perzeptrene (engl. Multi Layer Perceptrons) bestehen, zusätzlich zur Ein- und Ausgabeschicht, aus mindestens einer „verborgenen“ Zwischenschicht (engl. Hidden Layer; orangene Knoten). Je mehr Zwischenschichten, desto verborgener, damit „tiefer“ und komplexer ist das Modell.

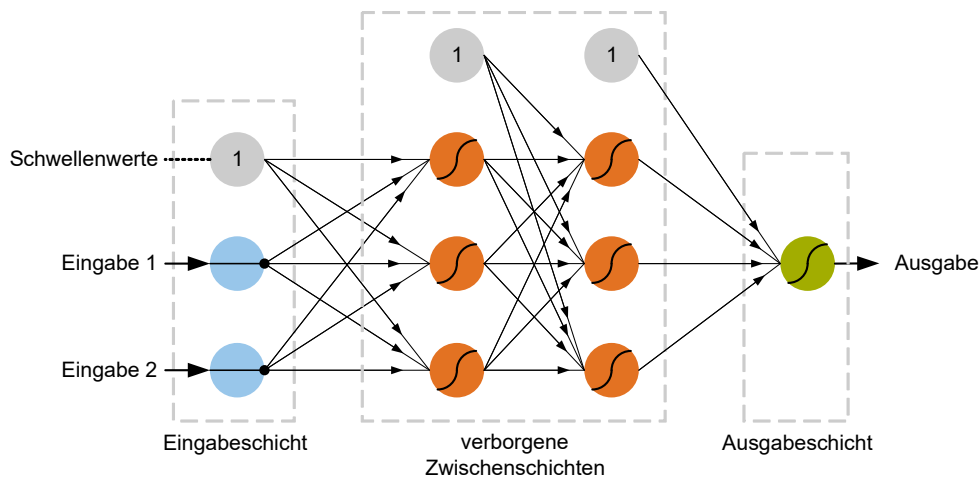


Abbildung 2-6: Schematische Darstellung eines dreilagigen ANN-Modells (eigene Darstellung nach [fml-2021f])

Das Grundprinzip von ANN-Modellen, das „Lernen“, ist die Verarbeitung und Gewichtung von Daten innerhalb der Knoten. Die Trainingsdaten werden zunächst von den Knotenpunkten der Eingangsschicht verarbeitet. Der Ausgabewert ist, vereinfacht ausgedrückt, die Prüfung, ob die festgelegten Schwellenwerte (engl. Thresholds oder Bias) $t_{(j)}$ (graue Knoten) erreicht werden oder nicht:

$$y_j = \begin{cases} 1, & \text{falls } \sum_{i=1}^n x_i w_i \geq t_{(j)} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (2-1)$$

Das Ergebnis dient dann als Eingang für die nachfolgenden Knotenpunkte der Zwischenschichten, die das Ergebnis mit Hilfe von Gewichtungsfaktoren optimieren. Gewichtungsfaktoren sind ein Maß für den Fehler zwischen den Ausgaben der Knotenpunkte und den

entsprechenden Zielwerten. Die letzte Schicht entspricht der Dimension der gesuchten Klassen. Für DL-Modelle reichen binäre Ausgabewerte nicht aus. Daher werden nichtlineare Funktionen eingeführt, so genannte **Aktivierungsfunktionen**, z. B. Sigmoid, ReLU (Rectified Linear Unit) oder Softmax [Dat-2023c]. Die Sigmoid-Funktion gibt eine Wahrscheinlichkeit für die Zugehörigkeit einer Klasse zwischen Null und Eins an. Eine recheneffizientere Alternative ist ReLU, das nur positive Eingangswerte zulässt bzw. negative Eingangswerte Null setzt. Im Gegensatz zu diesen beiden Funktionen, ist die Softmax-Funktion nichtlinear, was sich besonders für die Klassifikation von mehr als zwei Schichten eignet. Sie stellt sicher, dass die Summe der Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Klassen Eins nicht überschreitet.

Es gibt verschiedene ANN-Modelle, die sich in Aufbau und Verbindung unterscheiden. Die einfachste Form ist die unidirektionale Verknüpfung der Schichten, auch vorwärts gerichtetes **Feedforward Neural Network** genannt (siehe Abbildung 2-6). Liegt eine rekurrente Verknüpfung vor, bei denen Ausgaben früherer Zeitschritte als Eingaben zurückgeführt werden, entspricht das einem zeitlich rückgekoppelten **Recurrent Neural Network** (RNN)-Modell. Eine Art RNN-Modelle umzusetzen ist mit Hilfe von Long Short-Term Memory (LSTM) (dt. Langzeitgedächtnis) möglich [Shr-2019]. Zusätzlich zu den Eingängen, die in einfachen RNNs vorhanden sind, haben LSTMs einen zusätzlichen Langzeitzustand, der langfristige Abhängigkeiten speichern kann [Hoc-1997]. Dafür werden Zeitfenster definiert, wobei sich zwei benachbarte Intervalle bis auf einen Zeitschritt überlappen. RNN-Modelle kommen bei der Sensoranalyse in Kombination mit **Convolutional Neural Network** (CNN)-Modellen vor [Sla-2020]. CNN-Modelle werden verwendet, um die Datenverarbeitung nicht manuell, sondern mit Hilfe des Netzes aus den Sensordaten zu generieren [LeC-2015; Ord-2016]. Sie sind bereits Standard bei audio- und bildbasierten Datenverarbeitungen, z. B. bei der Spracherkennung [Ord-2016]. CNN-Modelle lernen Merkmale zu extrahieren, auch solche, die manuell wissensbasiert nur schwer abgeleitet werden können, für die Klassifizierung mit nachgeschalteten DL-Modellen aber von Vorteil sein können [Gér-2019; Ord-2016]. Eine Datenverarbeitung der Rohdaten hinsichtlich Ausreißern oder Rauschen ist nicht notwendig [Ord-2016]. CNN-Modelle bestehen in der Regel aus drei verschiedenen hintereinandergeschalteten Schichten: (1) Convolutional, (2) Pooling und (3) Softmax. Die Convolutional-Schicht bzw. Faltungsschicht gewichtet die Eingangsdaten, wobei lokale sich überlappende Bereiche pro Neuron betrachtet werden. Die Pooling-Schicht verwirft einen Großteil der extrahierten Merkmale, um Rechenzeit einzusparen. Sie findet vor allem in der Bilderkennung Vorteile. Die Softmax-Schicht schließt das mehrlagige CNN-Modell ab. Die Anzahl der Neuronen entspricht der Anzahl der zu klassifizierenden Aktivitäten. Die Ergebnisse der Neuronen werden normalisiert und als Wahrscheinlichkeitsverteilung dargestellt. Zusammenfassend liegen die Vorteile von ANN-Modellen im Umgang mit großen Datenmengen, deren Beziehungen weitestgehend unbekannt sind [Bha-2012].

Die Bewertung der erzielten Ergebnisse der implementierten ML-Modelle erfolgt anhand der Kreuzvalidierung, Lernkurve und Konfusionsmatrix [Sch-2019, S. 118 ff.]. Bei der **Kreuz-**

validierung (engl. Cross Validation) wird der Testdatensatz in bestimmte Teile eingeteilt (engl. Folds). Die Genauigkeit der Modelle in Abhängigkeit dieser Einteilung ist ein Maß für ihre Sensibilität auf unterschiedliche Testdaten. Over- und Underfitting sind mit Hilfe von **Lernkurven** (engl. Learning curve) gut zu erkennen. Sie geben die Genauigkeit für die Trainings- und Validierungsdaten an. Bei ML-Modellen werden diese Genauigkeiten in Abhängigkeit von der Anzahl der Trainingsdaten angegeben. Bei DL-Modellen erfolgt die Angabe in Abhängigkeit der Anzahl der Durchläufe bzw. Epochen (engl. Epochs) durch den vollständigen Trainingsdatensatz. **Konfusionsmatrizen** (engl. Confusion Matrix) geben das Verhältnis der vorhergesagten und der tatsächlichen Zielwerte an. Die Hauptdiagonale entspricht den richtigen Vorhersagen für die richtigen TP (engl. True Positives) und die falschen Zielwerte TN (engl. True Negatives). Die Nebendiagonalen entsprechen den fehlerhaften Vorhersagen für richtige FP (engl. False Positives) und falsche Zielwerte FN (engl. False Negatives). Die Genauigkeit (engl. Accuracy) und die empirische Fehlerrate (engl. Error) sind gegeben durch:

$$accuracy = 1 - error = \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN}. \quad (2-2)$$

Der $F1$ -Wert ist zusätzlich ein Maß für die Gesamtleistung eines ML-Modells, das sich wie folgt zusammensetzt:

$$F1 = \frac{TP}{TP + \frac{FN+FP}{2}}. \quad (2-3)$$

Bei der Auswertung der Ergebnisse von ML-Modellen wird die Fehlerrate von der Vorhersage und der Lösung ermittelt. Dabei ist besonders auf Over- und Underfitting (dt. Über- und Unteranpassung) zu achten [Goo-2016, S. 108–114; Sch-2019, S. 118 f.]. **Overfitting** bezeichnet ein überangepasstes Modell, d. h. das Modell orientiert sich zu sehr an den Trainingsdaten, die Anwendung auf neue Datensätze und damit die Generalisierbarkeit des Modells fällt schwer. Die Fehlerrate in der Trainingsphase ist gering, der Fehler in der Testphase ist hingegen hoch. Overfitting tritt auf, wenn das ML-Modell mit zu wenigen oder zu komplexen Trainingsdaten trainiert wurde. Zu den komplexen Daten zählen Datensätze mit Messabweichungen, sogenanntes Rauschen, irrelevanten oder redundanten Merkmalen oder Merkmalen, die zueinander abhängig, d. h. kollinear, sind. Diese Komplexität kann dazu führen, dass sich das ML-Modell zu viele Besonderheiten aus dem Trainingsdatensatz antrainiert. In der Folge wird das Modell zu komplex und verfügt nicht mehr über die nötige Generalisierbarkeit und Fähigkeit, den Testdatensatz ausreichend zu erkennen. Im Gegensatz dazu tritt **Underfitting** bei Modellen auf, die zu wenig komplex sind, um den Datensatz abzubilden. Die Fehlerrate ist hoch.

Datenübertragung mit Middleware-Systemen

Ein Middleware-System (dt. Datendrehscheibe) verwaltet die Integration und Verknüpfung von Daten zu verteilten Anwendungen oder Diensten [Ung-2016]. Im Gegensatz zur üblichen Punkt-zu-Punkt-Topologie, bei der die Daten direkt über Sockets (dt. Kommunikationsdienste) ausgetauscht werden, dient die Middleware als Übersetzungsschicht, so dass verschiedene Dienste miteinander kommunizieren können [Sey-2007; Tia-2010] (siehe Abbildung 2-7).

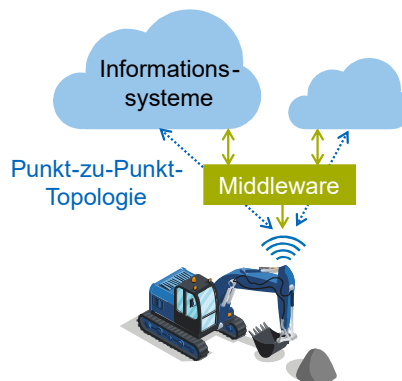


Abbildung 2-7: Schematische Darstellung von Punkt-zu-Punkt-Topologie vs. Middleware-System (eigene Darstellung)

Eine Middleware verwendet verschiedene Protokolle (z. B. TCP oder HTTP) und Schnittstellen (z. B. API) zur **Kommunikation**. Das Transmission Control Protokoll (TCP) zeichnet sich durch eine einfache, aber schnelle Funktionsweise aus. Es transportiert Daten über einen Strom von Bytes [IBM-2021]. Im Gegensatz zum kontinuierlichen Datenfluss sendet das Hypertext Transfer Protocol (HTTP) Nachrichten, die der Client zur Beantwortung an den Server sendet [IBM-2023]. Die Kommunikationsschnittstellen für Anwendungen sind die Anwendungsprogrammierschnittstellen (API). Falls sie den Designprinzipien des Representational State Transfer (REST) folgen, werden sie als REST-APIs bezeichnet und ermöglichen z. B. eine einheitliche Schnittstelle und eine mehrschichtige Systemarchitektur [Pro-2019].

Es gibt verschiedene standardisierte **Architekturen**, z. B. DDS (engl. Distribute Device Data for Real Time Systems) oder MQTT (engl. Message Queuing Telemetry Transport) [Ung-2016]. Sie sind auf bestimmte Schichten beschränkt. So wird MQTT nur für die Kommunikation von Gerät zu Server verwendet oder DDS nur für ein einzelnes System.

In den letzten Jahren kam die serviceorientierte Architektur (SOA) auf [Qil-2010]. In der SOA werden verteilte Anwendungen unter Verwendung von Diensten als Hauptkomponenten aufgebaut. Diese Dienste sind eigenständig und plattformunabhängig, sodass sie von den Anbietenden und von den Nutzenden der Dienste dynamisch genutzt werden können. Daneben wird eine Vermittlung zur Registrierung und zum Verzeichnis der Dienste benötigt [Rad-2017]. SOA konzentriert sich auf unternehmensweite oder sogar unterneh-

mensübergreifende Softwaresysteme. Eine standardisierte SOA-Architektur ist OPC-UA. Sie wurde ursprünglich für die interoperable Zusammenarbeit zwischen Robotern verschiedener Hersteller in der Produktion entwickelt.

Im Gegensatz dazu ist die Anwendung von **Microservice-Architektur (MSA)** auf kleinere Anwendungen, sogenannte Microservices, beschränkt, ohne den Anspruch auf Skalierbarkeit oder generische Protokolltransformationen zu stellen [Thö-2015]. Daher ist sie weniger komplex und einfacher zu implementieren. Die Vorteile von Microservices [Fis-2020] sind, dass sie unabhängig voneinander bereitgestellt, skaliert und getestet werden können.

Gerade die Datenübertragung ist in vielen Bestrebungen zu Digitalen Zwillingen im Bauwesen wenig beachtet [Tuh-2023]. Die Heterogenität der Daten hemmt Standardisierungsbestrebungen [Mad-2022]. Gleichzeitig ist der Aspekt der Datensicherheit eine große Herausforderung [Omr-2023].

Ein Beispiel für zu integrierende Dienste für Middleware-Systeme sind Informationssysteme. Zu Informationssystemen zählen Datenvorhaltungsdienste, wie z. B. Enterprise Resource Planning (ERP)-Systeme, (relationale Structured Query Language (SQL)-)Datenbanken oder internetbasierte **Plattformen**. Zu den Plattformen gehören in der Baulogistik Flottenverwaltungssysteme für den Geräteeinsatz oder Avisierungssoftware für die Materiallieferung. Sie dienen als Informationsschnittstelle zwischen Planung und Ausführung.

Je nach eingesetzter Technologie kann die Datenübertragung über verschiedene Funkverfahren erfolgen. Diese Funkverfahren werden entsprechend ihrer Reichweite unterteilt vom Nahbereich, z. B. NFC (Near-Field Communication), Bluetooth, RFID, UWB (engl. Ultra-Wideband) oder WLAN (Wireless Local Area Network), bis hin zu Weitbereichstechnologien, z. B. LoRa (Long Range) oder Mobilfunk.

Datennutzung mit BIM zur digitalen Modellierung

Digitale Modelle sind eine Komponente für die digitale Repräsentation der physischen Entität im Sinne des Digitalen Zwillings. Im Bauwesen gibt es verschiedene standardisierte Formate, wie BIM für Gebäude oder geografische Informationssysteme (GIS) für Topologien von Landschaften oder Städten [Son-2017].

Ursprünglich wurde BIM in den Neunzigern entwickelt, um die Geometrie von Bauteilen aus CAD (engl. Computer Aided Design) Modellen (3D) mit Eigenschaften, sogenannten Attributen, zu verknüpfen, z. B. Beton mit seiner Betongüte C25/30 [Koc-2018, S. 32 ff.]. Eine Erhöhung der Informationsdichte erfolgt durch die Verknüpfung der Objekte mit dem Terminplan (4D) und den Kosten (5D). Weitere Dimensionen sind möglich. Insofern wird BIM auch als Informationssystem gesehen, allerdings ohne Fokus auf die zusätzliche Bereitstellung

einer Datenübertragung. Es dient weiteren Analysen, z. B. für Simulationen, um verschiedene Planungsalternativen zu bewerten [Kön-2015]. Besonders wertvoll wird das BIM-Modell, wenn es über den Lebenszyklus hinweg mit aktualisierten Daten angereichert wird. BIM kann dann als dynamisches digitales Modell eines Bauwerks klassifiziert werden, das den Bauprozess überwacht, um aus den Ist-Daten einen Mehrwert zu generieren [Sha-2019].

Gerade der Baubetrieb in der Planungs- und Ausführungsphase eines Bauwerks, wie in dieser Arbeit betrachtet, ist geprägt von instationären wechselnden Produktionsstätten und -beteiligten. Eine einheitliche digitale Beschreibung des Bauprozesses kann anhand von Ontologien erfolgen [Bor-2024]. Sie ermöglicht die Verknüpfung geplanter Produkte (engl. as-designed) oder Prozesse (engl. as-planned) mit den tatsächlich ausgeführten Produkten (engl. as-built) oder Prozessen (engl. as-performed) [Sac-2020]. Vereinfacht wird im Folgenden bei Prozessdaten zwischen Plandaten (as-planned) bzw. Soll-Daten oder Baufortschrittsdaten (as-built) bzw. Ist-Daten gesprochen.

Ontologien ermöglichen eine maschinenlesbare Formalisierung von Prozessen, d. h. sie beschreiben semantisch ein begriffliches Modell [Gru-1993; Stu-1998]. Im Vergleich zu Taxonomien sind Ontologien nicht auf eine hierarchische Struktur beschränkt, um eine höhere Komplexität aufzubauen. Ontologien sind im Kontext von Digitalen Zwillingen geeignet, da sie von Maschinen gelesen und interpretiert werden können [Sch-2022]. Für die konsistente Umsetzung dient das standardisierte Datenformat IFC (engl. Industry Foundation Classes), das definiert und erweitert wurde durch die internationale Dachorganisation buildingSMART International [Bui-2022].

Insbesondere die Baulogistik kann von den Möglichkeiten profitieren, BIM zur Visualisierung und als zentrales Informationssystem zu nutzen [Geh-2023]. Zusätzlich zu produktionsspezifischen Daten, z. B. zum Einbauort von Materialien, zählen logistikspezifische Daten, wie z. B. zu verfügbaren Ladeflächen oder Transportbestimmungen.

Die Praxis zeigt allerdings, dass BIM noch nicht überwiegend und durchgängig genutzt wird [Bec-2023; Fos-2016] (siehe Anhang A). Eine Verknüpfung zu z. B. technischen Spezifikationen, Einbauanleitungen oder Baustoffhändlern fehlt [Geh-2023]. Weiterhin wird kritisiert, dass BIM Schwächen im Umgang mit großen Datenmengen mit Hilfe von KI aufweist [Sac-2020]. Es muss eine Aktualisierung des BIM-Modells über das Internet stattfinden [Fen-2021]. Visuelle Darstellungs- und Interaktionsformen auf Basis von Bedienoberflächen, virtueller oder erweiterter Realität (engl. Augmented oder Virtual Reality), KI oder Simulation sind notwendig, um die bereitgestellten Informationen zu verarbeiten und den Menschen vor Ort zur Verfügung zu stellen [Oes-2016]. Gerade im Tiefbau können durch die objektorientierte Herangehensweise z. B. Massen oder Topologie bei der Erdbewegung nicht abgedeckt werden. Im Spezialtiefbau wird für die Herstellung von Pfählen die Verwendung von BIM als sinnvoll erachtet und in einer deutschen Initiative des Hauptverbands der Deutschen Bauindustrie e. V. vorgeschlagen [HDB-2017]. Alternativ kann ein Geographic Information

System (GIS) verwendet werden, um den geografischen Kontext von Infrastruktursystemen zu erfassen. Die Softwarefunktionen von BIM und GIS überschneiden sich zunehmend [Liu-2017]. Gerade KMUs verfügen über weniger Möglichkeit die Expertise und Software, die für BIM notwendig sind, aufzubringen [Geh-2023].

Die Datennutzung in Form von Simulation wird im Folgekapitel 3 ausführlich behandelt und in den Kontext der aktuellen relevanten Forschung gesetzt.

3 Aktueller Stand zu simulationsgestützten Digitalen Zwillingen in der Baulogistik

3.1 Ereignisorientierte Simulation

3.1.1 Methoden

Simulationen sind computergestützte Nachbildungen bzw. Modelle zur Beschreibung von physischen Systemen [Bas-2008; Law-2013; VDI-3633]. Sie basieren auf mathematischen Modellen, die in Computermodele überführt werden [Bas-2008, S. 10].

Anders als bei der Durchführung von Experimenten an einem physischen System oder dessen Nachbildung, findet bei der Simulation die Systemnachbildung und -bewertung digital statt [Law-2013, S. 4f]. Sie ermöglicht (nicht) existierende Systeme vorab, störungsfrei, aufwandsarm und im Zeitraffer zu testen [VDI-3633]. Gleichzeitig ermöglicht die Simulation Lösungen, bei denen analytische Verfahren an ihre Grenzen stoßen. Deren mathematische Modelle suchen nach exakten Lösungen. Bei Systemen mit einem hohen Grad an Unsicherheit und hoher Komplexität sind Probleme mit vertretbarem Rechenaufwand nicht mehr oder nur schwer möglich lösbar, auch bekannt unter NP-Probleme, wobei NP für nichtdeterministisch polynomielle Zeit steht [Bla-1983].

Simulationsmodelle werden durch gegensätzliche Attribute klassifiziert: Nach Modellierung des Zeitablaufs (kontinuierlich vs. diskret), Zeitverhalten (statisch vs. dynamisch) und Zufallsverhalten (deterministisch vs. stochastisch) [Law-2013, S. 5 f.; Bas-2008, S. 14; Arn-2007, S. 77]. Zu den *kontinuierlichen Simulationen* gehören numerische Berechnungsverfahren, die mittels Differentialgleichungen gelöst werden, z. B. die Finite-Elemente-Methode zur Festigkeitsanalyse an Bauteilen. Dabei sind Zustandsänderungen zu jedem Zeitpunkt (kontinuierlich) eindeutig bestimmbar (deterministisch) [Arn-2007, S. 78]. Das Zeitverhalten kann statisch und dynamisch sein.

Im Gegensatz dazu handelt es sich bei Logistiksystemen um *diskrete Simulationen*, genauer um *ereignisdiskrete bzw. ereignisorientierte Simulationen* (engl. Discrete-Event-Simulation (DES)) [Arn-2007, S. 80; Gut-2017, S. 54]. Das Zeitverhalten ist meist dynamisch, das Zufallsverhalten deterministisch oder stochastisch. Die Simulation bietet die Möglichkeit, die (dynamischen) Prozesse von Materialflusssystemen vorab zu testen und Variantenuntersuchungen aufwandsarm durchzuführen [Abo-2010; Fei-2016]. Die Entscheidungsfindung wird so quantitativ unterstützt.

Ereignisorientierte Simulationen teilen Prozesse in Aktivitäten ein, die mittels Ereignissen ausgelöst werden [Arn-2007; Ele-2012] (siehe Abbildung 3-1).

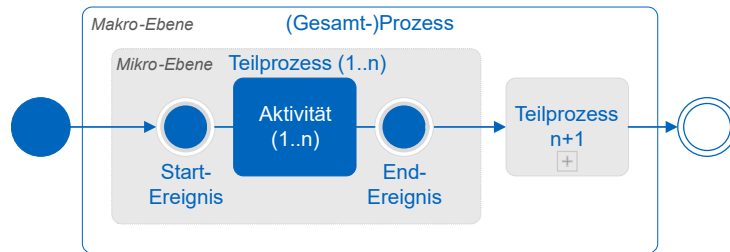


Abbildung 3-1: Schematische Darstellung der Bestandteile der ereignisorientierten Simulation: Prozess, Aktivität und Ereignis (eigene Darstellung nach [Ele-2012])

Ein **Ereignis** (engl. Event) bezeichnet die Zustandsänderung des Systems. Es ist nicht weiter zerlegbar und nimmt keine Simulationszeit in Anspruch. Der Eintritt eines Ereignisses löst eine Zustandsänderung im System aus. Dieser Systemzustand behält bis zum Eintritt des nächsten Ereignisses seine Gültigkeit.

Aus einem Anfangs- und einem Endereignis setzt sich eine **Aktivität** (engl. Activity) zusammen, wobei der Vorgang dieser Aktivität zwischen dem Anfangs- und Endereignis abläuft und eine bestimmte Zeitdauer verbraucht.

Ein **Prozess** (siehe Abschnitt 2.1.3) setzt sich aus einer zeitlich geordneten und inhaltlich zusammenhängenden Folge von Aktivitäten, die meist einem bestimmten Simulationsobjekt zugeordnet sind, zusammen.

Zustandsänderungen eines Systems können auf unterschiedliche Weisen ausgelöst werden: (1) nach der Zeit (zeitgesteuert), (2) nach Ereignissen (ereignisgesteuert), (3) nach Aktivitäten (aktivitätsorientiert) oder (4) nach Aufgaben und Zuständigkeiten innerhalb von Prozessen (prozessorientiert), die durch (5) Transaktionen vollzogen werden (transaktionsorientiert) [VDI-3633]. Sie sind entscheidend für die Klassifizierung der Simulationswerkzeuge und deren Modellierungskonzepte im nachfolgenden Abschnitt 3.1.2.

Die **Zeitintervalle zwischen den Ereignissen** können (deterministisch) oder zufällig (stochastisch) erfolgen [Arn-2007, S. 78]. Stochastische Simulationen werden auch *Monte-Carlo-Simulationen* genannt [Her-2021, S. 13f]. Die Zeitintervalle für die Ereignisse werden dabei zufällig aus einer Verteilung gezogen. Es benötigt hinreichend viele Simulationsläufe, bis die Ergebnisse in Summe zu einem Ergebnis konvergieren. Monte-Carlo-Simulationen gehören zu den statischen Simulationen.

Bei der Verwendung von Daten realer Bauprojekte werden die Dauern in einem Histogramm dargestellt und mit Hilfe von **Wahrscheinlichkeitsverteilungen**, genauer Häufigkeitsdichten von Verteilungsfunktionen, repräsentiert. Gängige Verteilungsfunktionen, kurz Verteilungen, sind z. B. die Exponential-, Gamma-, Lognormal-, Normal- und Weibull-Verteilung [Hen-2016, S. 297 ff.]. Die Definitionen der zugehörigen Funktionen können Henze [Hen-2016] entnommen werden. Die Daten für die Verteilungen müssen sich auf die Grundgesamtheit beziehen. Die vorliegenden Daten entsprechen meist einer Stichprobe. Mit Hilfe von *Schätzfunktionen*,

wie dem Maximum-Likelihood-Verfahren, kann anhand der Stichprobe ein Schätzwert ermittelt werden, der Rückschlüsse auf die Grundgesamtheit zulässt. Das Ergebnis der Schätzung wird mit dem negativen Log-Likelihood-Wert ausgedrückt. Je größer dieser Wert, desto höher ist die Anpassungsgüte an die Stichprobe. Die Auswahl der geeignetsten Verteilung für die gegebene Stichprobe kann grafisch oder rechnerisch mit Hilfe von *Anpassungstests*, z. B. dem Chi-Quadrat-, Kolmogorov-Smirnov- oder Anderson-Darling-Test, erfolgen [Ben-2013, S. 186]. Sie bestimmen die Abweichungen der Verteilung von der Häufigkeitsverteilung der Stichprobe [Ben-2013, S. 189 ff.].

Wird im Folgenden in dieser Arbeit der Begriff der Simulation verwendet, ist darunter die ereignisorientierte Simulation zu verstehen. Andernfalls wird darauf explizit verwiesen.

3.1.2 Modellierungskonzepte und ihre Werkzeuge

Die Simulationsmethode wird mit Hilfe von Simulationswerkzeugen softwaretechnisch umgesetzt. Die Simulationswerkzeuge setzen sich aus verschiedenen Modellierungskonzepten zusammen, die die Struktur und das Design für das zu implementierende System vorgeben: (1) Theoretische bzw. mathematische Konzepte, (2) generische Konzepte, (3) Sprachkonzepte und (4) anwendungsorientierte Konzepte [Arn-2007, S. 80f; Gut-2017, S. 71 ff.] (siehe Modellierungsphilosophien in [VDI-3633]).

Zu den **theoretischen bzw. mathematischen Konzepten** gehören Petri-Netze oder Warteschlangennetze. Ein *Petri-Netz* [Pet-1962; Sil-2012] ist ein Zustandsautomat mit verschiedenen Zuständen, die durch eine Marke, den sogenannten „Token“, ausgelöst werden. Sitzt der Token auf einem Zustand, läuft dessen Bearbeitungsdauer ab und löst danach das nächste Ereignis aus. Sie zählen daher auch zu den grafischen transaktionsorientierten Simulationsmethoden. Ein *Warteschlangennetz* besteht aus Stationen mit einem Warteraum mit (un-)endlichen Wartepätzen, der Warteschlange, für abzuarbeitende Aufträge. Eine Abarbeitungsstrategie löst die Abarbeitung dieser Aufträge aus, z. B. nach dem Prinzip First-In-First-Out (FIFO).

Generische Konzepte sind wiederverwendbare und anwendungsneutrale Konzepte. Über Attribute können Entitäten (engl. Entities) bestimmte Fähigkeiten zugeordnet werden, z. B. bei der objektorientierten Modellierung von BIM-Modellen (siehe Abschnitt 2.2.3). Weitere generische Konzepte sind die constraint-basierte Modellierung, der Agenten-Ansatz oder das Activity-Cycle-Diagramm. Bei der *constraint-basierten* Modellierung ist das Auslösen von Aktivitäten an Bedingungen gekoppelt [Kön-2007]. Horenburg [Hor-2014] bestimmt mit diesem Ansatz die optimale Reihenfolge von Bauprozessen. Voigtmann [Voi-2014, S. 54] und Wimmer [Wim-2014, S. 96f] übertragen den Ansatz auf die Wahl der nächsten auszuführenden Bauaufgabe und die Zuweisung von Ressourcen für die Planung der Vorgänge der Hoch- bzw. Tiefbauprozesse. Die Schwachstelle bei diesem Ansatz ist, dass

eine Entität (z. B. Bauaufgabe oder Ressource) blockiert ist, sobald die Wahl auf diese gefallen ist. Ein Hinzufügen von Anbaugeräten oder zusätzlichem Personal ist nicht möglich. Anders ist das beim *Agenten-Ansatz*. Hier agieren die Objekte als eigenständige „Agenten“ mit eigenen Regeln und Zielen [Wim-2014, S. 41]. Horenburg [Hor-2014] ordnet damit die optimale Prozessreihenfolge über bestimmte Ressourcen- und Verbindungszuweisungen zu. Das *Activity Cycle Diagram (ACD)* ist eine grafische Modellierung der Warteschlangennetze. Objekte lösen Aktivitäten aus und werden nach Beendigung in eine Warteschlange gesetzt. Die ACD-Modellierung ist eine aktivitätsorientierte Simulationsmethode.

Sprachkonzepte sind spezielle Programmiersprachen, auch Simulationssprachen genannt, die es ermöglichen, ein bestimmtes Modell zu beschreiben. SimTalk ist eine offene Programmiersprache, die für die Simulationssoftware Tecnomatix Plant Simulation von Siemens, kurz Plant Simulation, entwickelt wurde. Sie ermöglicht sowohl die Modellierung von agentenbasierten Ansätzen für die Terminplanung auf der Makro-Ebene [Hor-2014], als auch Petri-Netze für die Vorgänge von Produktionsprozessen auf der Mikro-Ebene [Sam-2013; Wim-2014] (siehe Abbildung 3-1).

Anwendungsorientierte Konzepte bilden spezifische Systeme ab. Ein Beispiel ist der *Bausteinkasten*, d. h. die Zusammenfassung von Modellierungselementen für eine bestimmte Anwendung zu einem Baustein. Diese Elemente enthalten vordefinierte Attribute, wie z. B. Geometrie (Weg, Bearbeitungsstation, Fahrzeug) und Funktion (Blockieren, Fertigen, Fahren), was die Programmierung erleichtert.

Die **softwareseitige Umsetzung für die Baulogistik** begann in den siebziger Jahren mit CYCLONE (CYCLic Operations NETwork), der Umsetzung des ACD-Ansatzes, um zyklische Bauprozesse zu simulieren [Hal-1977]. Ressourcen konnten dadurch nicht abgebildet werden [Abo-2010], sodass generalisierte Simulationssoftware für die Bauindustrie entstand [Abo-2016b] [Lou-2016, S. 23]. Martinez und Ioannou [Mar-1994] entwickelten die Simulationssprache STROBOSCOPE (STate-and ResOurce-Based Simulation of COnstruction ProcEsses), die in EZStrobe [Mar-2001] nach dem ACD-Prinzip softwaretechnisch umgesetzt wurde, um die Bedienung zu erleichtern. Die Verbindung von Bausteinen über Kanten und Knoten erfolgt mittels Drag-and-Drop Prinzip. Bausteine repräsentieren Ressourcen, wie Personal und Geräte. Louis [Lou-2016] präsentiert die Weiterentwicklung zu jStrobe, um zusätzlich Daten von Sensoren an Baugeräten einzubinden. Für die Simulationssoftware Plant Simulation wurden Bausteine aus der Schiffsbauindustrie [Ste-2006] für den Hochbau adaptiert [Ste-2010]. Eine weitere softwareseitige Umsetzung ist die Simulationsumgebung und -sprache Symphony bzw. Symphony.NET, um z. B. Tunnel-, Erdbewegungs- und Entwässerungsbauprojekte zu modellieren [Abo-2016b; Haj-1999].

3.2 Simulation als Digitaler Zwilling in der Baulogistik

3.2.1 Einordnung

In Anlehnung an die Diskussion um den Begriff des Digitalen Zwillings (siehe Abschnitt 2.1) zählt bereits die Simulation, die Daten einbezieht, als Digitaler Zwilling [San-2022a]. Die Simulation ist dabei entscheidend für die Entscheidungsunterstützung. Nach Rosen et al. [Ros-2015] ist der Digitale Zwilling „die nächste Welle in der Modellierungs-, Simulations- und Optimierungstechnologie“. Letztlich unterscheidet sich der Digitale Zwilling für Wright und Davidson [Wri-2020] von Digitalen Modellen durch das Nutzen unterschiedlicher digitaler Technologien inkl. der jeweils bestehenden Methoden, um deren Ergebnissen vertrauen zu können.

Damit geht das bisherige Verständnis von Simulation in das Verständnis von Digitalen Zwillingen über (siehe Abbildung 3-2). Die Verbindung verschiedener Digitaler Zwillinge geht über in Überlegungen zu Cyber-physischen Systemen und damit in die Überführung in einen Digitalen Zwilling nicht nur für die Baulogistik, sondern auch für die Bauwirtschaft. Zur Beschreibung dieser Evolution werden in der Literatur drei Merkmale genannt, die sich auf die eingesetzten digitalen Technologien beziehen: (1) Informationsdichte der Datensammlung über die Bauphasen hinweg, (2) Autonomie der Datenaufbereitung und (3) Konnektivität der Datenübertragung.

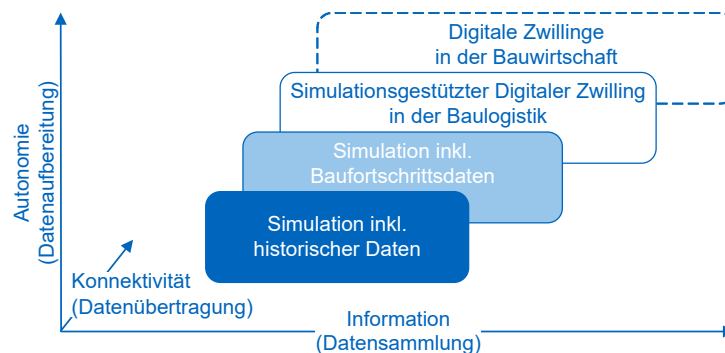


Abbildung 3-2: Evolution der ereignisorientierten Simulation zum Digitalen Zwilling in der Baulogistik (eigene Darstellung)

Mit dem Fortschreiten von Bauprojekten über die Bauphasen hinweg sammeln sich mehr **Informationen** an [Sac-2020]. Sacks et al. [Sac-2020] vergleicht diesen stetigen Anstieg mit den Entwicklungsstufen eines Menschen, vom Säugling (Entwurf) zum Erwachsenen (Betrieb). In Abbildung 3-2 ist diese Entwicklung auch in der Simulation ersichtlich. Historische Daten bilden die Eingangsdaten für die Simulation. Kommt es während der Planungsphase zu Änderungen, kann die Simulation daran angepasst werden. Das gleiche Prinzip herrscht in der Ausführungsphase mit Ist-Daten. Von einem Digitalen Zwilling in der Baulogistik kann gesprochen werden, wenn weitere digitale Technologien eingesetzt werden, um die Simulation mit Daten zu aktualisieren.

Die **Autonomie** ist ein weiteres Merkmal für die Evolution der Simulation zum Digitalen Zwilling [Ros-2015; San-2022a]. Eine automatisierte Datensammlung und -aufbereitung beugt Fehlern vor und unterstützt bei der Selektion und Nutzung von anfallenden Daten [Gol-2013; Kan-2000]. Auch die Simulation profitiert von einer möglichst automatisierten Modellierung, um den bauspezifischen Randbedingungen mit einer erhöhten Flexibilität entgegenzutreten [Cor-2024].

Daneben bietet Industrie 4.0 eine Echtzeitfähigkeit bzw. **Konnektivität** der verschiedenen digitalen Technologien inkl. der Simulation [Aga-2020]. Die Größe für „Echtzeit“ ist im Bauwesen, anders als in der stationären Produktionssteuerung, nicht Minuten oder Sekunden, sondern Tage und Wochen [Yeu-2022]. Die Simulation selbst ist dabei losgelöst von den zeitlichen Anforderungen der Sensoren zur Datensammlung, da sie ereignisorientiert, d. h. bedarfsorientiert, für Entscheidungen herangezogen wird [San-2022a]. Die Datenübertragung spielt in den bisherigen Vorgehensmodellen für die Simulation keine Rolle [Tuh-2023].

In der Literatur wird betont, dass die Einführung von digitalen Technologien, ob BIM [Sac-2020] oder Simulation [Wic-2020], Vorgehensmodelle für die **Integration in die Praxis** erfordern. Dazu gehört, dass die Vorgehensmodelle nicht nur Methoden zur Entwicklung von digitalen Technologien, sondern auch zur Systemintegration beinhalten.

Um sich begrifflich abzugrenzen wird im Folgenden der Begriff des simulationsgestützten Digitalen Zwillings eingeführt. Damit wird ausschließlich die ereignisorientierte Simulation zur Datennutzung für den Digitalen Zwilling herangezogen. Diese Simulation ist damit das auserwählte Werkzeug zur Abbildung und Optimierung von Materialflusssystemen, wie sie in der Baulogistik vorkommen. Alle weiteren digitalen Technologien dienen der Dateneinbindung in die Simulation, um diese, im Sinne eines Digitalen Zwillings (siehe Definition 2.2.1), zu aktualisieren. Unter dem Begriff des Digitalen Zwillings wird im Folgenden sowohl eine simulationsgestützte technologische Entwicklung in der Baulogistik als auch ein Vorgehensmodell zur Integration in das Bauproduktionssystem verstanden (siehe Definition 2.2.2).

Definition: simulationsgestützter Digitaler Zwilling in der Baulogistik

Zum Digitalen Zwilling in der Baulogistik gehört die ereignisorientierte Simulation. Sie dient der dynamischen digitalen Optimierung. Als solches übernimmt sie die **Funktion der Datennutzung**. Sie ist angewiesen auf die weiteren Komponenten zur **Verknüpfung mit dem realen Bauproduktionssystem**: Datensammlung, -aufbereitung und -übertragung. Als Vorgehensmodell erfolgt deren **technologische Entwicklung**, aber auch **Integration** in die Baupraxis. (Eigene Definition)

3.2.2 Bisherige Vorgehensmodelle

Der Vergleich der Literatur zu Digitalen Zwillingen in den verschiedenen Anwendungsbe-
reichen der Baulogistik zeigt die verschiedenen Ausprägungen, aber auch die Vielfalt an
bereits existierenden Lösungen auf. Diesen Lösungsansätzen fehlen bisher allerdings ei-
ne bereichsübergreifende Vorgehensweise für die Entwicklung Digitaler Zwillinge. Darüber
hinaus wird, neben der Entwicklung, vor allem deren Systemintegration in die Baupraxis
vernachlässigt. Im Folgenden werden verschiedene Vorgehensmodelle für Digitale Zwillin-
ge aus der (Bau-)Logistik anhand der in Abschnitt 3.1.1 aufgestellten Merkmale diskutiert.
Tabelle 3-1 fasst die Ergebnisse zusammen.

*Tabelle 3-1: Klassifikation relevanter Vorgehensmodelle für die Entwicklung und Integration von simulati-
onsgestützten Digitalen Zwillingen aus dem Bereich der (Bau-)Logistik (eigene Darstellung)*

Referenz	Anwendung			Digitale Technologie			System
	Stationär	Hochbau	Tiefbau	Information	Automation	Konnektivität	Integration
[VDI-3633]	●			●	●		
[San-2022b]	●			●	●	●	
[Mar-2010]			●	●	●		
[Gün-2011]			●	●			
[Büg-2016]			●	●	●		
[Ras-2021a]	●		●	●	●		
[Abd-2020c; Wic-2020]			●	●		●	●
[Yeu-2022]		●		●		●	●
[Gre-2020]		●	●	●	●	●	

Vorgehensmodelle sind systematische Beschreibungen von Vorgehensweisen für die Durch-
führung von Simulationsstudien [Gut-2017, S. 141 f.]. Sie sind notwendig, um reproduzierbare
und damit vergleichbare Simulationsstudien zu erzielen [Rob-2011].

Für die Produktion und Logistik gibt es nach Rabe et al. [Rab-2008, S. 27 f.] verschiedene
Ansätze für Vorgehensmodelle für die Simulation: Im deutschsprachigen Raum nach VDI-
Richtlinie 3633 [VDI-3633] und im englischsprachigen Raum nach Banks et al. [Ban-2010,
S. 17] oder Law [Law-2013, S. 67]. Die aktuelle Version der VDI-Richtlinie 3633 [VDI-
3633] basiert auf dem Vorgehensmodell von Rabe et al. [Rab-2008] (siehe auch [Gut-2017,
S. 141-218]). Sie besteht aus fünf Simulations- (1, 2, 4, 6, 7) und zwei Datenphasen (3,
5), die sich parallel aus der Zielbeschreibung ergeben, und die wiederum zu konkreten
Teilergebnissen führen: (1) Die Aufgabendefinition führt zur Aufgabenspezifikation, (2) die
Systemanalyse zum Konzeptmodell, (3) die Datenbeschaffung zu den Rohdaten, (4) die
Modellformalisierung zum formalen Modell, (5) die Datenaufbereitung zu aufbereiteten Daten,
(6) die Implementierung zum ausführbaren Modell und (7) die Experimente und Analysen zu

den Simulationsergebnissen. Durch die Definition der Teilergebnisse wird eine Verifikation und Validierung während der gesamten Simulationsstudie ermöglicht [Ban-1988] (zitiert nach [Rab-2008, S. 7]).

Im Vorgehensmodell für die Simulation bleibt eine detaillierte Aufschlüsselung von Methoden im Umgang mit Daten aus. Es werden bei der Datensammlung Methoden, wie die manuelle Aufzeichnung und tabellarische Dokumentation, genannt oder auf die Einbindung von bereits bestehenden ERP-Systemen verwiesen [Rab-2008, S. 86]. Die Datenaufbereitung zählt verschiedene Methoden auf, z. B. die Filterung der Daten, Transformation in ein anderes Format oder die stochastische Aufbereitung der Daten zu Wahrscheinlichkeitsverteilungen [Rab-2008, S. 52]. Die Datenübertragung wird nicht als separater Baustein aufgeführt. Eine Aufteilung der Daten erfolgt nach Systemlast- (Aufträgen, Produktspezifikationen), Organisations- (Arbeitszeiten, Ressourcen, Prozess) und technischen Daten (Produktionsstätte, Fertigung, Materialfluss, Störungen) [VDI-3633, Abb. 11]. Insgesamt sind die Bausteine linear angeordnet. Eine Adaptivität bei Änderungen durch Daten in verschiedenen Phasen ist aufgrund der abgeschlossenen Systeme weniger von Interesse.

Das Vorgehensmodell von Santos et al. [San-2022b] bindet die Simulation in den Digitalen Zwilling ein. Ziel ist die kontinuierliche Aktualisierung der Simulation. Die Validierung erfolgt anhand eines Anwendungsbeispiels aus der Intralogistik. Dabei werden nicht-automatisierte Prozesse betrachtet, was einem Bauproduktionssystem ähnelt. Die Datensammlung erfolgt über Barcodes an den Materialien, die Datenaufbereitung über das ERP-System, die Datenübertragung über WLAN und die Datennutzung über die Simulationssoftware Flexsim inkl. Visualisierung in einer eigens implementierten Oberfläche in Microsoft Excel. Eine Erweiterung zur periodischen Überwachung von Aktivitäten mit kNN wird in nachfolgenden Arbeiten [San-2023b; San-2023a] durchgeführt. Neben der Konnektivität bewerten sie zum Vergleich von Simulation und dem Digitalen Zwilling auch den Grad der Autonomie. Durch das vorhandene ERP-System und die Oberfläche zur Bedienung der Simulation liegt ein hoher Automatisierungsgrad vor. Sie betonen, dass der Grad der Autonomie stark von den vorliegenden Randbedingungen abhängt.

Martinez [Mar-2010] zeigt ein Vorgehensmodell zur Anwendung von Simulation im Bereich der Erdbewegung. Er betont auch die besonderen Herausforderungen bei der Modellierung von bauspezifischen Randbedingungen: (1) Unikatcharakter, (2) hohe Abhängigkeiten und (3) Variabilität im Bauprozess. Letzteres zeigt sich z. B. in der Inhomogenität von Sensordaten von Geräten bei unterschiedlichen Wetterverhältnissen oder bei der Bestimmung von Start- und Endzeiten der durchgeführten Aktivitäten. Insgesamt ist eine gewissenhafte Sammlung und Aufbereitung der Daten erforderlich, um valide Ergebnisse zu erhalten.

Günthner und Borrmann [Gün-2011, S. 168] führen das 5-Phasen-Modell nach Kudlich [Kud-2000] ein. Im Gegensatz zur VDI-Richtlinie 3633 [VDI-3633] sind alle Phasen als Kreis angeordnet und miteinander verbunden. Wie Martinez [Mar-2010] weisen auch Günthner

und Borrmann [Gün-2011, S. 176] auf die bauspezifischen Besonderheiten bei der Modellierung von Bauaufgaben hin. Die Eingangsdaten fokussieren sich auf Informationen zu den eingesetzten Geräten: 3D-Modelle für Objekte, Kosten aus der Kalkulation, Objekteigenschaften aus Plattformen mit Maschinendaten und Zeiten für den Terminplan [Gün-2011, S. 182]. Das Vorgehensmodell geht nicht näher auf die Methoden zur Datenaufbereitung und -übertragung ein.

Bügler [Büg-2016] stellt einen Ansatz für einen Digitalen Zwilling vor, der auf der Integration von Ist-Daten basiert. Zur Datensammlung wird ausschließlich Photogrammetrie eingesetzt. Auf die Datenübertragung wird nicht eingegangen. Die Datennutzung basiert auf einem agentenbasierten Simulationsansatz. Die Validierung erfolgt anhand eines Anwendungsbeispiels zur Herstellung von Pfahlwänden im Spezialtiefbau. Der Fokus seiner Arbeit liegt mehr auf der technischen Herausforderung und weniger auf der Integration und Umsetzung des Digitalen Zwillings in der Baupraxis.

Das Vorgehensmodell von Rashid [Ras-2021a] beschreibt die Einbindung und Aufbereitung von Daten in die Simulation. Das Vorgehensmodell basiert auf drei Phasen: (1) Erkennung der Aktivitäten auf Basis von gesammelten Sensordaten mit IMUs und mit Hilfe von DL-Modellen, (2) Modellierung und Implementierung der Simulation und (3) Aktualisierung der Simulation mit Hilfe von aktualisierten Wahrscheinlichkeitsverteilungen durch den Satz von Bayes. Die erste Phase entspricht damit der Datensammlung und -aufbereitung. Die zweite und dritte Phase entsprechen der Datennutzung mit Hilfe von Simulation. Das Vorgehensmodell wird an zwei Anwendungsbeispielen aus dem Tiefbau und dem Modulbau validiert. Insgesamt wird durch die Verwendung von DLs und dem Satz von Bayes ein hoher Grad an Autonomie für eine hohe Aktualisierungsrate angestrebt. Die Datenübertragung wird nicht abgedeckt. Methoden zur Integration in die Baupraxis sind nicht enthalten.

Die Integration in die Baupraxis schafft Abdelmegid [Abd-2020c] durch die Einbindung der Simulation in die Bauphasen des Lean-basierten Last Planner® Systems. Durch diese Zuordnung erfolgt die Modellierung und Implementierung sowohl während der Planungs- als auch in der Ausführungsphase. Als Anwendungsbeispiel dient die Pfahlherstellung im Spezialtiefbau. Wickramasekara et al. [Wic-2020] ergänzen die Arbeit durch die parallele zentrale Bereitstellung von Informationen über die Planung und die Ausführung mit Hilfe von BIM als einzige Datenquelle. Daten von TaT-Technologien oder Sensorsystemen werden nicht miteinbezogen.

Yeung et al. [Yeu-2022] bauen auf dem Vorgehensmodell für Digitale Zwillinge nach Sacks et al. [Sac-2020] für Bauwerke im Hochbau auf und ergänzen die Simulation. Das Bauproduktionssystem unterscheidet zwischen Produkt und Prozess. Eine zusätzliche Unterscheidung in Ressourcen, wie sie im Tiefbau eine übergeordnete Rolle spielen, fehlt. Die Simulation stellt die Informationen bereit, um den Bauprozess zu verbessern. Gleichzeitig wird ein virtueller PDCA-Zyklus als Vorgehensmodell für Simulationsstudien vorgestellt: Modellierung

(virtuelles *Plan* bzw. Planen (dt.)), Implementierung (virtuelles *Do* bzw. Tun (dt.)), Verifikation und Validierung der Simulation (virtuelles *Check* bzw. Prüfen (dt.)) und Verbesserung der Modellierung (virtuelles *Act* bzw. Handeln (dt.)), womit der Zyklus geschlossen wird. Sie führen zusätzlich Kriterien ein, um die Simulation als Digitalen Zwilling zu evaluieren, wie die Relevanz, Nachvollziehbarkeit, Vollständigkeit, Detailtiefe, wahrheitsgetreue Nachbildung, Wiederverwendbarkeit, sowie Flexibilität, Erweiterbarkeit, Kalibrierbarkeit, Automatisierbarkeit, Stochastizität und BIM-Integration. Die Validierung dieses Vorgehensmodells steht noch aus.

Greif et al. [Gre-2020] zeigen einen dreistufigen Ansatz, der sich auf den Grad der Autonomie eines Digitalen Zwillings in der Baulogistik bezieht: (1) „Lightweight Digital Twins“ für die reine Datennutzung, (2) „Multi-Physics, Multi-Scale Simulation Systems“ inkl. Datenfusion, (3) „Autonomous Systems“ ohne menschliche Entscheidungsunterstützung. Das Anwendungsbeispiel von Greif et al. [Gre-2020] beschränkt sich auf die Routenoptimierung bei der Versorgung von Lieferketten. Die Arbeit fokussiert die Umsetzung und Systembeschreibung des Digitalen Zwillings, nicht das Vorgehen für dessen Etablierung.

Vorgehensmodelle, die sich explizit auf die Anwendung von Simulation als Digitaler Zwilling in der Baulogistik zur Optimierung des Bauproduktionssystems beziehen, fehlen (siehe Tabelle 3-1). Die Zusammenführung von physischen und digitalen Systemen wird nicht ausreichend behandelt. Bei der Umsetzung muss auf die Herausforderungen in den spezifischen Anwendungsbereichen eingegangen werden. Bisherige Vorgehensmodelle fokussieren die Optimierung von Produktionssystemen aus dem Hoch- oder Tiefbau. Aus technologischer Sicht wird in den bisherigen Vorgehensmodellen die Übertragung von Daten vernachlässigt [Tuh-2023]. Aus Systemsicht ist die Validierung anhand praktischer Anwendungsbeispiele noch selten und stark eingeschränkt auf die spezifischen Anwendungen.

3.2.3 Anwendungsbereiche

Modulbau

Simulationsstudien haben insbesondere in den industriellen stationären Vorproduktionen, wie dem Modulbau, Vorteile [Mos-2016]. Grund dafür ist die gleichbleibende Produktionsumgebung. Simulationsmodelle können in diesem Fall aufwandsarm für neu aufkommende Fragestellungen wiederverwendet oder leicht angepasst werden.

Durch die Vorproduktion in stationären Produktionsanlagen im Modulbau ergeben sich für den Hochbau neue Möglichkeiten. Zur Optimierung der Produktion auf der Baustelle werden bestimmte Produktionsschritte ausgelagert. Aus produktionslogistischen Gesichtspunkten zeigt eine Studie von McKinsey & Company [McK-2019] Vorteile hinsichtlich einer Verkürzung von Einbauzeiten um bis zu 50 % und einer Senkung der Kosten um bis zu 20 % auf. Insgesamt werden die baustellenspezifischen Randbedingungen wie Witterungseinflüsse

nicht oder bewusst rationalisiert. Durch Vorproduktion, Modularität und die Standardisierung von Bauprozessen trägt die modulare Bauweisen dazu bei, die Komplexität und Prozessvarianz des traditionellen Bauwesens zu reduzieren [Alv-2006; Höö-2008]. Der Modulbau ist der höchste Grad an Vorproduktion. Eine Vorstufe bildet die Vorproduktion von einzelnen Bau(teil)elementen, wie z. B. Stützbalken, Treppen oder ganzen Decken und Wänden. Gegenüber der Vorproduktion von Teilbauelementen wird im Modulbau versucht, einzelne Module soweit fertig herzustellen, dass diese auf der Baustelle nur noch zusammengebaut werden.

Tabelle 3-2 zeigt die Übersicht über die relevanten Forschungsansätze zur Simulation als Digitalen Zwilling im Bereich Modulbau, auf die im Folgenden im Detail eingegangen wird.

Tabelle 3-2: Relevante Forschungsansätze im Bereich Modulbau (eigene Darstellung)

Referenz	Bauphase	Datensammlung	Datenaufbereitung	Datenübertragung	Datennutzung (Simulation)
[Alv-2006]	Planung, Fertigung, Versand	Manuelle Zeitmessung (Bearbeitungszeiten, Lieferzeiten)	Normalverteilung	–	Zusammenspiel von Produktion und Versorgungslogistik (ACD, STROBOSCOPE)
[Als-2020]	Fertigung	Manuelle Zeitmessung der Eingangsdaten (Warte- und Durchlaufzeit)	(Dreiecks-)Verteilung	–	Steigerung der Durchlaufzeit (constraint-basiert, Symphony.NET)
[Ras-2021b]	Zusammenbau	IMU an Bearbeitungsstationen	DL-Modell (LSTM, Softmax) zur Aktivitätserkennung	–	Produktionsüberwachung (–)
[Pan-2023b; Pan-2023a]	Zusammenbau	BIM-Modell der Modul(-bauteile), stationäre Kameras	DL-Modell zur Detektion von Arbeitenden und Bauteilen	–	Produktionsüberwachung (–)
[Cor-2019]	Fertigung, Zusammenbau	RFID-System zur Lokalisierung	Normalverteilung	–	Bestimmung der Taktzeit (Petri-Netz, Coloured Petri Net Software)
[Alt-2018]	Fertigung	BIM-Modelle der Modulelemente, RFID-System zur Lokalisierung	Manuelles Filtern, Glätten, Ableiten einer Linearen Regression	Datenbank	Vorhersage der Durchlaufzeit (constraint-basiert, Symphony.NET)

Da Alves et al. [Alv-2006] untersuchen den Einfluss der Lieferkette bei Fertigteilen für die technische Gebäudeausrüstung mit Lüftungskanälen – von der Planung (Baufaufgabe) über die Produktion bis zur Installation auf der Baustelle (Bauleistung). Sie führen dazu eine Simulationsstudie in STROBOSCOPE durch (siehe Abschnitt 3.1.2). Sie zeigen, dass sich die Bauleistung mit erhöhter Variabilität bei der Durchlaufzeit in der Produktion und steigenden Lieferanforderungen an die Lagerung verschlechtert. Die Datensammlung erfolgt manuell. Es liegen keine ausreichenden Informationen über die einzelnen Aktivitäten an den Bearbeitungsstationen sowie die Lieferzeiten von Materialien vor, sodass Normalverteilungen angenommen werden. Da Alves et al. betonen daher die Bedeutung einer ausreichenden Datengrundlage für die Planung und Simulation bei Modulbauanlagen. Der Betrachtungsgegenstand ist der Einfluss der Produktion auf die Versorgungslogistik der Baustelle. Der Einfluss von Materialflüssen und Beständen auf die Optimierung innerhalb der Produktion wird nicht untersucht.

Alsakka et al. [Als-2020] betrachten eine Produktionsanlage mit verschiedenen Produktionslinien im Modulbau. Es werden die Bearbeitungsstationen von Boden, Dach und Wänden

modelliert. Ziel ist die Steigerung von zwölf auf 15 Module pro Woche. Zur Anforderungsanalyse wird die Modulbauanlage besichtigt und es werden Interviews mit Expert*innen geführt. Verschiedene Verbesserungsvorschläge werden hinsichtlich dem Einfluss von zusätzlichem Personal oder effektiveren Produktionsanlagen ausgewertet. Die Simulationsstudie wird in Symphony.NET [Abo-2016a] durchgeführt. Es liegt kein Fokus auf der Einbindung von Daten. Die Datensammlung erfolgt manuell durch das Zeitnehmen von Warte- und Durchlaufzeit der Module bzgl. der einzelnen Bearbeitungsstationen. Die Aufbereitung erfolgt mit Hilfe von Wahrscheinlichkeitsverteilungen. Fehlende Daten werden mit Dreiecksfunktionen abgebildet. Zwar wird die Auslastung der Produktionsanlage optimiert, der Einfluss der Produktionslogistik hinsichtlich Beständen wird nicht untersucht.

Rashid und Louis [Ras-2021b] installieren IMUs an einer Bearbeitungsstation, um über Vibrationen Rückschlüsse auf die Aktivitäts- und Stillstandszeiten der Module zu ziehen. Auf Basis dieser Informationen kann eine Engpassanalyse angestoßen werden, um ggf. Bearbeitungsstationen neu anzuordnen oder zusätzliche Ressourcen zuzuweisen. Parallel werden Videos aufgezeichnet, um die Sensordaten nachfolgend mit Hilfe von überwachten DL-Modellen zu trainieren. Es wird ein LSTM mit Softmax-Schicht eingesetzt. Die Datenübertragung in die Simulation sowie eine Simulationsstudie selbst wird nicht thematisiert.

Panahi et al. [Pan-2023b] nutzen fest installierte Überwachungskameras an bestimmten Bearbeitungsstationen. Ziel ist die automatisierte bildbasierte Erkennung von Arbeitenden auf der Bearbeitungsstation in Echtzeit. Dadurch kann identifiziert werden, ob an der Bearbeitungsstation gearbeitet wird und Stillstände können ggf. frühzeitig erkannt werden. Zur Datenaufbereitung wird ein spezielles CNN-Modell aus dem DL eingesetzt. Nachfolgende Arbeiten [Pan-2023a] zeigen die erfolgreiche Verknüpfung dieser Methode mit BIM. BIM dient dazu, die Position der Bauteile auf dem Modul für die Installation vorzugeben. Eine Simulation wird in beiden Fällen nicht zusätzlich eingesetzt.

Correa [Cor-2019] nutzt RFID, um die Produktionszeiten in einem Holzfertigteilwerk zu messen und so die Taktzeit mit Hilfe von Simulation anzupassen. Das Simulationsmodell wird als zeitgesteuertes Petri-Netz in einer speziellen Software namens Coloured Petri Net [Rat-2003] aufgebaut. Das RFID-System besteht aus drei Lesegeräten und neun Antennen, die temporär an einzelnen Produktionsstätten angebracht werden. Durch die Anbringung von zwei Tags an den durchlaufenden Wandelementen können die Bearbeitungszeiten gemessen werden. Die Datenmenge wird allerdings nur an zwei Tagen erhoben, was zu keiner statistischen Aussagekraft führt.

Altaf et al. [Alt-2018] führen eine ähnliche Studie wie Correa [Cor-2019] durch. Die Simulation ermöglicht die Vorhersage der Durchlaufzeiten der Modulelemente auf Basis der tatsächlichen Daten aus dem RFID-System. Es werden druckbare RFID Tags genutzt, um die Modulelemente (Wände, Böden und Decken aus Holz) direkt mit dem BIM-Modell verbinden zu können. Insgesamt werden zwölf Antennen über die gesamte Produktionsanlage verteilt,

um die Bauteile zu lokalisieren. Die Daten werden dazu gefiltert, von Rauschen befreit und als lineare Regression aufbereitet. Als Simulationssoftware wird Symphony.NET eingesetzt. Die Verifikation und Validierung des Simulationsmodells erfolgt anhand der RFID-Daten. Insgesamt zeigen Altaf et al. sehr gute Ergebnisse mit der Einbindung von RFID-Daten in die Simulation. Nähere Angaben zur Datenübertragung mit Hilfe einer zentralen Datenbank gehen nicht hervor. Der Fokus liegt stark auf der Produktion einzelner Modulelemente, nicht im Zusammenbau zum Modul.

Insgesamt findet die Simulation Anwendung im Modulbau, insbesondere im Hinblick auf die Produktion. Die Optimierung der Produktionsanlagen hat einen entscheidenden Einfluss auf die spätere Fertigstellung auf der Baustelle und damit auf das gesamte Bauprojekt. Untersuchungen zum Einfluss von Ressourcen innerhalb der Produktionslogistik wie Transportbehältern fehlt. Verschiedene digitale Technologien finden ihre Anwendung bei der Datensammlung für die Bearbeitungszeiten in den einzelnen Stationen. Die Umsetzung der Datenübertragung in die Simulation findet keine Beachtung.

Innenausbau im Hochbau

Der nachfolgende Abschnitt wurde in Teilen der Masterarbeit von Gschwendtner [fml-2021] erarbeitet und gemeinsam in [Gsc-2021] veröffentlicht.

Tabelle 3-3 zeigt die Übersicht über die relevanten Forschungsansätze zur Simulation als Teil des Digitalen Zwillings im Bereich Innenausbau im Hochbau, auf die im Folgenden im Detail eingegangen wird.

Tabelle 3-3: Relevante Forschungsansätze im Bereich Hochbau (eigene Darstellung)

Referenz	Bauphase	Datensammlung	Datenaufbereitung	Datenübertragung	Datennutzung (Simulation)
[Web-2007]	Planung	CAD-Modell, Terminplan	Normalverteilung	SQL-Datenbank	Verkehrseinfluss bei der Anlieferung (Petri-Netz, Enterprise Dynamics)
[Bam-2019]	Planung	Beobachtungen, Ursache-Wirkungs-Modell, Terminplan, Lieferliste	(Dreiecks-)Verteilung	–	Einfluss von Lean-Methoden auf die Produktivität (3D-Detailmodell, Simio)
[Kug-2012]	Planung	CAD-Gebäudemodell	–	SQL-Datenbank	Kopplung von CAD mit Simulation zur aufwandsarmen Simulation (agentenbasiert, CiSmo)
[Voi-2014]	Planung	Terminplan, Lieferliste	–	–	Modularer Simulationsansatz, Strategien für die Versorgung der Produktion (constraint-basiert, Bausteine, Plant Simulation)
[Sch-2014b]	Planung, Ausführung	Multimodell-Container inkl. Terminplan, BIM, Ressourcen, etc., BPMN	BIM-Software	Plattform, grafische Oberfläche für Witterung	Ressourcen-, Flächenbelegung, Bauendzeit (constraint-basiert, Bausteine, Petri-Netz, Plant Simulation)
[Jur-2024]	Ausführung	Passive RFID Tags	–	Plattform für Verknüpfung mit BIM	Materialverfolgung (–)
[Cor-2024]	Ausführung	GPS zur Lokalisierung, IMU zur Aktivitätserkennung	–	LoRa, MQTT	Materialverfolgung, Aktualisierung von BIM (–)
[Kos-2024]	Ausführung	Stationäres Kamerasystem	DL	OPC-UA	Objektverfolgung (–)
[Geh-2023]	Ausführung	BIM	Erweiterung von BIM um Baulogistikdaten (statisch), Aktualisierung mit TaT-Daten	–	BIM zur Materialverfolgung und zentrales Informationssystem (–)

Weber [Web-2007] hat zum Ziel, ein digitales Werkzeug zu entwickeln, das bei der Umsetzung von Logistikstrategien unterstützt. Er nutzt die Software Enterprise Dynamics der INCONTROL GmbH, um logistische Bauprozesse zu modellieren, einschließlich der Materialanlieferung auf der Baustelle, der möglichen Materiallagerung und der Verteilung an die Einbauorte. Die benötigten Materialmengen werden aus dem CAD-Modell des geplanten Hotelgebäudes entnommen und anschließend mit den Prozessen verknüpft. In der Simulation werden Fahrpläne verwendet, um den Zeitpunkt des Transports und den Bestimmungsort des Materials festzulegen. Der Baubetrieb wird nicht untersucht, da das Hauptziel der Studie darin besteht, Entladezonen und Transportmittel in der frühen Planungsphase zu dimensionieren.

Bamana et al. [Bam-2019] untersuchen den Einfluss von Lean-Methoden zu Produktions- und Logistikstrategien auf die Produktivität auf der Baustelle. Es wird der Einbau von industriell vorgefertigten Bauteilen für ein sechsstöckiges Holzgebäude in Kanada betrachtet. Die Modellierung basiert auf Beobachtungen zur Bestimmung der Einflussfaktoren. Als Eingangsdaten für die Simulation dienen Bau- und Terminpläne. Für die Simulation wird ein 3D-Modell in der Software Simio erstellt. Verschiedene Lean-Methoden, z. B. Vorproduktion, 5S oder JIT, werden getestet. Obwohl nur ein Gewerk betrachtet wird, liefert die detaillierte Modellierung von Transport, Lagerung und Bewegung der Arbeitenden, die sowohl die Logistik als auch die Gewerke betrifft, ein recht genaues Verständnis wichtiger logistischer Bauprozesse. Die Verwendung von digitalen Technologien zur Übertragung der Daten, sowohl in der Planungs- als auch in der Ausführungsphase, sind nicht Bestandteil der Untersuchungen.

Kugler [Kug-2012] zielt darauf ab, ein Werkzeug mit einem hohen Automatisierungsgrad bei der Datenerfassung und einer einfachen Bedienoberfläche bereitzustellen, das auf verschiedene Hochbauprojekte angewendet werden kann. Zur Validierung seines Software-Prototyps CiSmo wendet er das agentenbasierte Simulationsmodell auf zwei reale Projekte an, ein Passivhausprojekt und ein Seniorenzentrum mit drei Stockwerken. Die Modellierung und Parametrisierung des Simulationsmodells wird mit CAD-Modellen verbunden. Die Interaktion wird über eine SQL-Datenbank realisiert. Allerdings konzentriert er sich auf die direkten produktionslogistischen Bauprozesse und vernachlässigt deren Ver- und Entsorgung [Voi-2014]. Weiterhin wird die Einbindung von Ist-Daten während der Ausführung vernachlässigt.

Die Studie von Voigtmann [Voi-2014] ist die relevanteste für den modularen Simulationsansatz für das Anwendungsbeispiel im Hochbau in Kapitel 6. Ziel ist die Entwicklung eines modularen Simulationsansatzes für die logistischen Bauprozesse beim Innenausbau eines mehrstöckigen Bürogebäudes. Dabei werden die Bauprozesse eines constraint-basierten Simulationsmodells implementiert, das auf Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen und Ressourcenanforderungen basiert. Die logistischen Bauprozesse decken die Versorgung der Materialien ab inkl. der Anlieferung auf die Baustelle bis zum Transport zum eigentlichen Einbauort. Die Implementierung erfolgt in der Simulationssoftware Plant Simulation auf

Basis der Bibliotheken aus dem Schiffsbau [Ste-2006; Ste-2010]. Voigtmann erwähnt, dass Entsorgungsaufgaben berücksichtigt werden müssen, um ein vollständigeres Verständnis der Logistik vor Ort zu erhalten. Allerdings ging sie davon aus, dass das Material genau in der benötigten Menge geliefert wird und vernachlässigt den Materialabfall, d. h. die Entsorgungslogistik wird nicht berücksichtigt. In ihrem Ausblick sieht Voigtmann [Voi-2014] Potenzial in der Nutzung von Sensoren und dem „berührungslosen“ Datenaustausch zur Vereinfachung und damit Anwendbarkeit der Simulation im Bau.

In den letzten Jahrzehnten hat sich BIM statt CAD zur Modellierung von Bauwerken durchgesetzt [Sch-2014a]. Im Bundprojekt Mefisto wurde ein Multimodellkonzept entwickelt, um die verschiedenen BIM-Fachmodelle in die Simulation zu integrieren [Sch-2014b, S. 13, 43–53]. Für die Logistik werden im speziellen zwei verschiedene modulare Simulationsmodelle vorgestellt. Ein Ansatz nutzt die Bibliotheken aus dem Schiffsbau [Ste-2006; Ste-2010] [Sch-2014b, S. 13, 75–106]. Die Datenaufbereitung erfolgt mit Hilfe einer eigens entwickelten Oberfläche. Ein weiterer Ansatz basiert auf verschiedenen Bausteinen, um die unterschiedlichen Fachmodelle, wie Geometrie, Terminplan oder Ressourcen, in die Simulation einzubinden [Sch-2014b, S. 107–128]. Die Aufbereitung der BIM-Modelle erfolgt mit Hilfe einer eigens entwickelten Software [Sch-2014a, S. 335–372]. Die Bauprozesse werden als Petri-Netze implementiert, wobei eine automatisierte Generierung durch die Verknüpfung zu BPMN-Diagrammen entwickelt wird [Sch-2011]. In beiden Fällen dienen Datenbanken bzw. eigens entwickelte Plattformen zur Datenübertragung. Als Datenbasis dient der Terminplan für ein Hotelbauprojekt. Die Logistik beschränkt sich auf die Modellierung von Lagerkapazitäten und den Materialtransport mit Hilfe der Ressource Kran. Um Störungen auf den Bauzeitenplan während der Ausführung zu berücksichtigen, werden die Auswirkungen von Witterungseinflüssen implementiert [Sch-2014b, S. 129–148], allerdings nicht auf Basis aktueller Wetterdaten. Es werden nur Bauprozesse aus dem Rohbau betrachtet, nicht aus dem Innenausbau.

Die nachfolgenden Forschungsarbeiten konzentrieren sich auf die Datensammlung, -aufbereitung und -übertragung. Sie nutzen keine Simulation zur Datennutzung.

Juraboev und Díaz [Jur-2024] nutzen passive RFID-Tags zur Einbindung von Daten während der Ausführung, um vorgefertigte Bauteile von der Produktionsstätte bis zum Einbauort zu markieren. Die Tags verweisen auf eine Plattform, auf der die aktuellen Informationen aus dem BIM-Modell zur Verfügung gestellt werden.

Ein ähnliches Konzept verfolgen auch Correa et al. [Cor-2024]. Zur Datensammlung werden Tracker mit GPS-Sensorik zur Lokalisierung und IMUs zur Aufnahme von Bewegungen vorgefertigter Bauteile eingesetzt. Die Daten werden anschließend manuell zur Aktualisierung von BIM aufbereitet. Eine automatisierte Aktivitätserkennung wird nicht angestrebt. Die Datenübertragung erfolgt mit Hilfe einer LoRa-Verbindung und einer MQTT-Plattform. Ihr An-

wendungsbeispiel bezieht sich jedoch nicht auf den Baubetrieb, sondern auf die vernetzende Ebene von Versorgungsketten (siehe Abbildung 2-1). Sie betonen, dass Digitale Zwillinge ein Umdenken bei der Planung erfordern, z. B. durch Lean-Methoden wie PDCA.

Kosse et al. [Kos-2024] stellen ein stationäres Kamerasystem zur Objektverfolgung auf der Baustelle vor. Die Datenaufbereitung erfolgt mit Hilfe von DL-Modellen. Gleichzeitig binden sie die Daten in die standardisierte Umgebung von OPC-UA ein. Die Anwendung an einem Praxisbeispiel steht noch aus.

Gehring und Rüppel [Geh-2023] zeigen die Möglichkeiten für einen Digitalen Zwilling für die Baulogistik auf Basis von BIM zur Visualisierung und als zentrales Informationssystem auf. Zusätzlich zu produktionsspezifischen Daten, z. B. zum Einbauort von Materialien, zählen sie logistikspezifische Daten auf, z. B. zu verfügbaren Ladeflächen, Transportbestimmungen, etc. Ihr Anwendungsbeispiel bezieht sich dabei stark auf den Innenausbau im Hochbau. Eine der Limitationen bezieht sich auf die Verbreitung von BIM in der Baupraxis. BIM muss um technische Spezifikationen und Einbauanleitungen erweitert und mit dem Baustoffhandel verknüpft werden. Sie merken an, dass gerade KMUs nicht die Möglichkeit haben, die Fachexpertise und Software, die für BIM notwendig sind, aufzubringen.

Insgesamt wird die Simulation im Bereich Innenausbau im Hochbau zur Untersuchung verschiedener logistischer Bauprozesse und deren Einfluss auf den Baufortschritt angewendet. Um den bauspezifischen Randbedingungen, insbesondere dem Unikatcharakter, entgegenzukommen (siehe Abschnitt 1.2), werden modulare Ansätze für Simulationsmodelle in der Literatur angestrebt. Dabei fehlt es an Modellen, die sowohl Ver- als auch Entsorgungsaufgaben (d. h. die Entsorgung von Abfällen oder den Umgang mit überschüssigem Material auf der Baustelle) berücksichtigen und sich dabei auf die verfügbaren logistischen Ressourcen konzentrieren, die je nach Bedarf zur Unterstützung des Betriebs geteilt werden. Arbeiten, die sich auf digitale Technologien zur Datensammlung, -aufbereitung und -übertragung während der Ausführung konzentrieren, vernachlässigen die Datennutzung in der Simulation.

Tiefbau

Der nachfolgende Abschnitt wurde in Teilen in den Studienarbeiten von [fml-2020j; fml-2021f] erarbeitet und in [Fis-2021b; Fis-2021c; Fis-2023a] veröffentlicht.

Tabelle 3-4 zeigt die Übersicht über die relevanten Forschungsansätze zur Simulation als Teil des Digitalen Zwillinges im Bereich Tiefbau, auf die im Folgenden im Detail eingegangen wird.

Wimmer [Wim-2014] untersucht die verschiedenen Modellierungsebenen bei Erdbewegungsprojekten: (1) Projekt-, (2) Prozess- und (3) Kinematikebene. Er nutzt eine Monte-Carlo-Simulation zur Optimierung von Terminplänen (1), ein bausteinbasiertes Petri-Netz zur

Tabelle 3-4: Relevante Forschungsansätze im Bereich Tiefbau (eigene Darstellung)

Referenz	Bauphase	Datensammlung	Datenaufbereitung	Datenübertragung	Datennutzung (Simulation)
[Wim-2014]	Planung, Ausführung	Terminplan, Maschinendaten, Baugrundmodell, Wetterdaten	–	–	Vorhersage der Bauendzeit, Lade- und Transportoptimierung (constraint-basiert, Bausteine, Plant Simulation)
[Hor-2014; Wen-2016a]	Planung, Ausführung	Terminplan	Dreiecksverteilungen	SQL-Datenbank, grafische Oberfläche zur manuellen Eingabe von Ist-Daten	Ressourcenabhängige Terminplanoptimierung (agentenbasiert, Plant Simulation)
[Büg-2016] [Büg-2017]	Planung, Ausführung	Einzelne stationäre und mobile Kameras	Videoanalyse, Photogrammetrie	–	Ressourcenabhängige Terminplanoptimierung, Produktivität (agentenbasiert)
[Kim-2018]	Ausführung	Stationäres Kamerasystem	Bilderkennung mit CNN	–	Optimierung der Ressourcenallokation (ACD, WebCYCLONE)
[Akh-2015b; Akh-2018]	Ausführung	Mobiltelefone als IMU und GPS	DT, kNN, LR, SVM, ANN; Verteilungsfunktionen	–	Vergleich von statischer und dynamischer Bauendvorhersage (ACD, STROBOSCOPE)
[Ahn-2015a; Ahn-2015b; Ahn-2015c]	Ausführung	IMU in der Fahrkabine	DT, NB, kNN, ANN	Spezifische Ontologie	Generierung von Simulationsmodellen, Maschineneffektivität (ACD)
[Lou-2016; Lou-2017; Lou-2018]	Ausführung	Synthetische Daten aus Roboterplattform	Regelbasierte Ableitung von Zustandsänderungen	Internetprotokolle	Ausführungssteuerung (ACD, jStrobe)
[Ras-2019; Ras-2020; Ras-2022]	Ausführung	IMUs an Auslegergelenken	DT, SVM, kNN, ANN, LSTM, Normalverteilung	–	Generierung von Simulationsmodellen, Baufortschrittsvorhersage, Produktivität (ACD, jStrobe)
[Gün-2016b]	Ausführung	Telematikdaten	–	Plattform	Logistikstrategien (Plant Simulation)
[Kar-2015]	Planung, Ausführung	Terminplan, Pfahlwandmodell	–	Plattform	Baufortschrittsvorhersage (Petri-Netz, Plant Simulation)
[Abd-2022]	Planung, Ausführung	Terminplan, Layout, Geräte, Ausfallzeiten	–	–	Baufortschrittsvorhersage (JaamSim)

Optimierung des Ladevorgangs (2) und eine Kinematiksimulation zur Berechnung von Transportzeiten unter Berücksichtigung von Umwelteinflüssen wie Wetter und Verkehr (3). Die Umsetzung erfolgt in der Simulationssoftware Plant Simulation. Als Basis dienen verschiedene Planungsdaten, wie Terminplan, Maschinendaten, Baugrundmodell und Wetterdaten. Die Einbindung von Ist-Daten wird nicht betrachtet.

Vertiefte Simulationsstudien zur agentenbasierten Optimierung von Terminplänen führen Horenburg [Hor-2014], sowie Günthner und Wenzler [Gün-2016d; Wen-2016a] durch. Das Simulationsmodell wird in der Simulationssoftware Plant Simulation implementiert. Die Validierung erfolgt anhand eines synthetischen Datensatzes und eines realen Bauprojekts zur Herstellung einer Baugrube mit einer Pfahlwandumschließung. Zusätzlich wird die statische Einbindung eines aktualisierten Terminplans vorgesehen. Die Datensammlung, -aufbereitung und -übertragung erfolgt nicht.

Auch Bügler [Büg-2016] entwickelt einen agentenbasierten Optimierungsansatz für Terminpläne. Um den Baufortschritt digital zu erfassen, werden Kameras eingesetzt und mit Hilfe von Videoanalyse und Photogrammetrie ausgewertet (siehe Abschnitt 2.2.3). Die Datenübertragung wird nicht behandelt. Die Datennutzung erfolgt mit Hilfe eines agentenbasierten Simulationsansatzes. Fokus der Arbeit ist die technische Herausforderung, weniger die Integration und Umsetzung des Digitalen Zwillings in die Baupraxis.

Kim et al. [Kim-2018] präsentieren einen videobasierten Ansatz zur Erdbewegungsanalyse im Tunnelbau. Das Simulationsmodell wird in der Simulationssoftware WebCYLONE [Hal-1973; Hal-1992] implementiert. Für die Datenaufbereitung werden CNNs genutzt. Ziel ist die Optimierung der Ressourcenallokation.

Akhavian und Behzadan [Akh-2015b] verwenden Mobiltelefone zur Aufzeichnung von Beschleunigung und Position eines Frontladers bei Erdarbeiten. Durch die Identifizierung von Aktivitäten wie „Motor aus“, „Arbeiten“ und „Leerlauf“ können Rückschlüsse auf die Dauer und Produktivität der Arbeiten gezogen werden. Beim Versuch, drei oder mehr Aktivitäten mit Hilfe von ML zu erkennen, verschlechtert sich die Genauigkeit auf unter 90 %. Es werden verschiedene ML-Modelle getestet: DT, kNN, LR, SVM und ANN. Sie klassifizieren Aktivitäten auf verschiedenen Detailebenen (engl. Level of Detail (LoD)), um den Einfluss der vorgeschlagenen Kategorien hinsichtlich der ausgewählten Klasse zu untersuchen. Die Anzahl der LoDs definiert, wie oft die Kategorien in Klassen unterteilt werden. Ebenso definiert sie die Granularität, mit der die Kategorien beschrieben werden (siehe Abbildung 3-3). So beschreibt LoD1 z. B. „Motor an“ oder „Motor aus“, während LoD2 „Motor an“ in „Leerlauf“ und „Betrieb“ unterteilt ist.

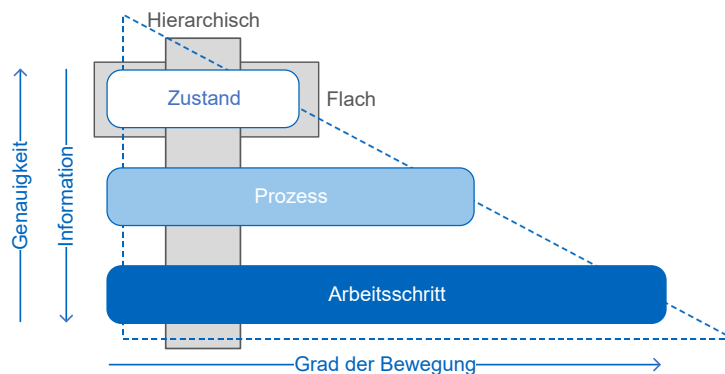


Abbildung 3-3: Klassifizierungsproblem bei der Modellierung der Aktivitätserkennung auf Grundlage von [Har-2021; Akh-2015b] (weiß: LoD1; hellblau: LoD2; blau: LoD3; eigene Darstellung nach [Fis-2023a])

Eine ähnliche Studie mit Mobiltelefonen zur Datensammlung und -aufbereitung mit den ML-Modellen wird von Akhavian und Behzadan [Akh-2015a; Akh-2018] auch zur Aktivitätserkennung bei Arbeitenden durchgeführt. Das Simulationsmodell basiert auf dem ACD-Ansatz und wird in der Simulationssoftware STROBOSCOPE implementiert. Die Ergebnisse mit und ohne aktualisierten Daten werden verglichen, wobei in beiden Fällen mit passenden Verteilungsfunktionen gearbeitet wird. Die Daten werden in einem Test unter Laborbedingungen, nicht an einem Praxisbeispiel getestet.

Ahn et al. [Ahn-2015a] verwenden kostengünstige IMUs zur Messung der Beschleunigung in drei Richtungen. Die Sensoren werden in der Fahrkabine installiert. Sie verwenden die folgenden ML-Modelle: DT, NB, kNN und ANN. In weiteren Arbeiten werden die automatisierte

Modellierung von ACD-basierten Simulationsmodellen auf Basis der erkannten Aktivitäten betrachtet [Ahn-2015c] sowie eine zugehörige Architektur zur Einbindung der Daten [Ahn-2015b]. Eine Verknüpfung der einzelnen Arbeiten findet nicht statt.

Louis und Dunston [Lou-2016; Lou-2017; Lou-2018] aktualisieren ein Simulationsmodell dynamisch mit synthetisch generierten Daten aus einer virtuellen Roboterplattform. Ziel ist die Steuerung eines Erdbewegungsprojekts mit Hilfe einer virtuellen Umgebung [Lou-2017; Lou-2018] und einem Miniaturroboter [Lou-2016]. Sie modellieren den Bauprozess als Petri-Netz. Für die Interaktion mit der Plattform wurde STROBOSCOPE um eine Datenschnittstelle zu jStrobe erweitert. Über die Datenschnittstelle werden vorher festgelegte Zustände wie Geschwindigkeit oder Position der Transportfahrzeuge übertragen. Die Datenübertragung in die Simulation erfolgt mit Hilfe der Microsoft Winsock API mit Internetprotokollen [Lou-2016], die in einem realen Projekt mit Hilfe von IoT erfolgen können [Lou-2017]. Die Anwendung und Validierung an einem solchen Projekt fehlt.

Rashid und Louis [Ras-2022] führen eine Studie durch, um die Dateneinbindung in ein Simulationsmodell zu zeigen. Die Datensammlung und -aufbereitung basiert auf früheren Arbeiten [Ras-2019; Ras-2020]. IMUs werden an den einzelnen Gelenken am Ausleger eines Hydraulikbaggers [Ras-2019; Ras-2020] und Frontladers [Ras-2019] angebracht. Als Klassifizierungsmodelle werden DT, SVM, kNN und ANN [Ras-2020] bzw. LSTM und ANN [Ras-2019] betrachtet. Rashid und Louis [Ras-2020] bestätigen die Beobachtungen von Akhavian und Behzadan [Akh-2015b], dass die Genauigkeit der ML-Modelle mit steigender Anzahl an Merkmalen und damit Informationsdichte abnimmt (siehe Abbildung 3-3). Weiterhin untersuchen sie die Verwendung einer flachen Klassifizierung mit bis zu neun LoDs, wobei neun die Anzahl der Aktivitäten ist. In Rashid und Louis [Ras-2022] werden zwei Hydraulikbagger und drei Muldenkipper mit einzelnen IMUs und GPS Sensoren ausgestattet. Aus den Sensordaten werden Aktivitäten abgeleitet. Die Position der Muldenkipper ermöglicht die Zuordnung zu einem der beiden Hydraulikbagger. Aus den erkannten Aktivitäten wird, ähnlich wie in [Ahn-2015c], ein Petri-Netz generiert [Ras-2022]. Weiterhin werden für die Dauern der Aktivitäten mit Hilfe des Chi-Quadrat-Tests Normalverteilungen für die Simulation in jStrobe abgeleitet. Während der Ausführung werden die Normalverteilungen alle zwei Tage aktualisiert. Die Simulationsstudie dient dem Vergleich mit dem tatsächlichen Baufortschritt. Die Datenübertragung wird nicht thematisiert.

Im Projekt BauFlott [Gün-2016a] kann über einen Software- und einen Hardware-in-the-Loop Aufbau für eine simulierte Flotte von Hydraulikbaggern (Quellen), Muldenkipper (intermittierende Transportelemente) und Dozern, die den Abraum an der Verkipfung einbringen (Senken), gezeigt werden, dass sich die Bauprozesszeit deutlich verkürzen lässt, wenn die Muldenkipper als Schwarm arbeiten und alle Maschinen direkt miteinander verbunden sind. Als Vorstufe für die Echtzeit-Simulation wird in der Simulationssoftware Plant Simulation eine Erdbewegungsbaustelle simuliert und an einen Echtzeitrechner gesendet, der den zugehörigen Zustand der Baugeräte steuert, die entsprechenden Sensordaten als standardisierte

Bussignale generiert und an die Telematikeinheit (Hardware) sendet. Hierzu wird eine eigens entwickelte internetbasierte Plattform namens FleeTUM genutzt. Die Validierung erfolgt unter Laborbedingungen und wurde nicht in der Praxis getestet.

Die Arbeit von Kargul et al. [Kar-2015] dient als Vorbild für das Anwendungsbeispiel im Bereich Spezialtiefbau in Kapitel 7. Zur Einbindung von Ist-Daten bei der Herstellung einer Pfahlwand wird ein internetbasierter Simulationsansatz entwickelt. Die Simulationssoftware Plant Simulation wird zur Modellierung eines Petri-Netzes für die drei Bauprozessschritte „Bohren“, „Betonieren“ und „Umsetzen“ genutzt. Die Dauer wird aus historischen Daten eines Projekts ermittelt und geeignete Verteilungsfunktionen abgeleitet. Die Daten werden in drei Stufen des Baufortschritts (25 %, 50 % und 75 % Fertigstellung) eingeteilt, um die Auswirkungen der datengestützten Modellierung zu zeigen. Eine speziell entwickelte Plattform mit grafischer Oberfläche dient der manuellen Aktualisierung von Terminplänen. Die Datensammlung und -aufbereitung wird als gegeben vorausgesetzt.

Abdelmegid et al. [Abd-2022] zeigen ebenfalls eine vielversprechende Simulation zur Vorhersage von Baufortschrittsvorhersagen im Zusammenhang mit der Pfahlproduktion im Spezialtiefbau. Ihr Modellierungskonzept differenziert zwischen dem Prozess zur Herstellung des Pfahls als Produkt und den dafür notwendigen Ressourcen aus Bohrgeräten, Hilfsgeräten (Radlader, Kran) und Fahrmischer für Beton. Ihre Simulation basiert auf manuell aufbereiteten Daten von Bohrprotokollen. Ausfälle der Ressourcen werden mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit und Häufigkeit abgebildet. Anpassungsfaktoren werden ermittelt, um den Baufortschritt bestmöglich abzubilden. Die Implementierung erfolgt in einer nicht-kommerziellen Simulationssoftware namens Jaams [Kin-2013]. Aufgrund der hohen Unsicherheiten, die sich aus den Bodenverhältnissen ergeben, weisen sie darauf hin, dass die Simulation für den Spezialtiefbau in Zukunft von besonderer Bedeutung sein wird.

Hinsichtlich der Aktivitätserkennung wird insbesondere auch auf die Arbeit von Harichandran et al. [Har-2021] hingewiesen. Sie erweitern die flache Klassifizierung von Akhavian und Behzadan [Akh-2015b] um eine hierarchische Klassifizierung und somit die Leistung zu steigern (siehe Abbildung 3-3). Die Verwendung eines hierarchischen Ansatzes ermöglicht es, die Baumstruktur der Klassen auszunutzen und so die Anzahl der Klassen, die in einem Klassifizierungsmodell berücksichtigt werden müssen, zu reduzieren, d. h. es müssen viel weniger Klassen unterschieden werden. Im Gegensatz dazu muss bei einer flachen Klassifikation zwischen einer großen Anzahl von Klassen unterschieden werden, was sehr komplexe Modelle erfordert, um subtile Unterschiede in den Daten zu erkennen. Insgesamt kommen Akhavian und Behzadan [Akh-2015b] und Harichandran et al. [Har-2021] zu dem Schluss, dass die Wahl einer Klassifizierung von der Art der Ausrüstung, ihrem Betrieb und dem Zweck der Datenanalyse abhängt. Sie konzentrieren sich auf den Teil der Aktivitätsmodellierung, der Gerätezustände, Vorgänge und hierarchische Beziehungen umfasst. Außerdem muss der Zweck der Aktivitätserkennung für die Betriebserkennung geklärt sein,

z. B. Kraftstoffverbrauch (LoD1), Emissionsrate (LoD2), Gesamtproduktivität (LoD3) und Zykluszeit (LoD4). Sie geben an, dass die Daten je nach Zweck genügend verarbeitete Informationen enthalten müssen.

Verschiedene Arbeiten zeigen, dass das überwachte Lernen mit ML-Modellen geeignet ist für die Aktivitätserkennung von Bauprozessen, z. B. anhand von Geräten wie Frontlader [Akh-2015b; Ras-2019], Hydraulikbagger [Gol-2013; Ras-2019; Ras-2020; Ras-2022; Sla-2020] oder Walzen [Sla-2020]. Besonders robust erweisen sich dabei die DL-Modelle [Ras-2019; Sla-2020]. Allerdings ist die Genauigkeit der Modelle stark von den Merkmalen und der Datenmenge abhängig, sodass die Anwendung verschiedener Modelle zielführend ist [Gol-1989] aus [Akh-2015b]. Insgesamt stellt die Aufbereitung von Daten in einer hohen Qualität einen entscheidenden Baustein für die Einführung von Digitalen Zwillingen in der Bauindustrie dar [Hu-2022].

Die Literatur zum Anwendungsbereich des Tiefbaus zeigt, dass der Umgang mit Daten einen höheren Stellenwert hat als die Optimierung der Simulation selbst. Grund dafür sind die geräteintensiven Prozesse, die bereits einen gewissen Grad an Automatisierungslösungen mit sich bringen. Die Integration von Ist-Daten kann die Qualität der Simulationsergebnisse verbessern. So können große Effizienz- und Qualitätspotenziale innerhalb der Simulation überprüft werden. Es kommen verschiedene extern installierte Sensorsysteme an Geräten für die Datensammlung zum Einsatz. Zur automatisierten Aktivitätserkennung hat sich KI bewährt. Die Datenübertragung in die Simulation basiert meist auf internetbasierten Ansätzen. Lösungsansätze, die die bereits vorhandenen Sensordaten von Geräten für die Baufortschrittsvorhersage verwenden, fehlen.

3.3 Forschungsbedarf

3.3.1 Herausforderungen von simulationsgestützten Digitalen Zwillingen in der Baulogistik

In den letzten Jahren ist die Bedeutung von Simulation durch die Möglichkeiten von Industrie 4.0 in den Vordergrund der Forschung gerückt. In verschiedenen Bereichen der Baulogistik, vom Modul-, Hoch- bis Tiefbau, existieren bereits Lösungsansätze, um Daten aus der Planungs- und Bauausführung in die Simulation einzubinden. Dieser Einsatz verschiedener digitaler Technologien zur digitalen Unterstützung des eigentlichen Bauprozesses wird als Digitaler Zwilling bezeichnet.

Bisherige Vorgehensmodelle zu simulationsgestützten Digitalen Zwillingen betrachten nicht explizit den Einfluss der Baulogistik. Im Unterschied zur stationären Industrie muss in der Bauindustrie dabei folgendes bei der Integration von Digitalen Zwillingen bedacht werden:

- **Geringer Grad an Standardisierung:** Systematische Modellierungskonzepte, da wenig standardisierte Prozesse;
- **Hohe Volatilität:** Aktualisierung der Eingangsdaten in Planungs- und Ausführungsphase, um fundierte Entscheidungen treffen zu können;
- **Stark erfahrungsbasierter analytischer Entscheidungsprozess:** Validierung der Ergebnisse in enger Abstimmung mit den Expert*innen im operativen Bereich.

Die stationären Bedingungen im Modulbau erleichtern die Anwendung von Simulation. Auch die automatisierte Sammlung und Aufbereitung von Daten wird bereits in der Forschung behandelt. Fokus ist dabei insbesondere die Produktionsüberwachung und -kontrolle. Die Wechselwirkung von Produktion und Logistik wurde noch nicht umfassend untersucht.

Im Hochbau liegt der Fokus auf TaT-Technologien zur Verfolgung von Materiallieferungen, wobei die Methoden noch stark manuell geprägt sind. Aufgrund der hohen Komplexität durch die vielen Beteiligten kommt der flexiblen Modellierung der Simulation eine höhere Bedeutung zu.

Der Tiefbau nimmt mit seinen Bestrebungen nach Automatisierung eine Vorreiterrolle hinsichtlich der Anwendung der Simulation in der Ausführungsphase ein. Verschiedene Arbeiten beschäftigen sich mit der automatisierten Aktivitätserkennung von Baugeräten. Die Ansätze sind stark geprägt von der Erdbewegung.

Relevante Arbeiten im Bereich der Simulation als Digitaler Zwilling wurden in Abschnitt 3.2.3 anhand der vier Bausteine für Digitale Zwillinge eingeordnet. Daraus resultiert zusammengefasst der folgende aktuelle Stand mit den dazugehörigen Herausforderungen und Defiziten:

1. **Datensammlung:**

- Die Datensammlung bezieht sich auf die Auswahl von möglichen Datenquellen aus der Planung und Ausführung, z. B. von Bauteilen oder Geräten. In der Planung stammen die Daten aus Datenbanken von historischen Projekten, aus digitalen Modellen zu Produkten, wie z. B. Gebäuden (BIM) oder der Umgebung (GIS), Prozessen (BPMN) oder Ressourcen (Flottenmanagementsysteme). In der Ausführung stammen die Daten von TaT-Technologien oder Sensorsystemen.
- Bisherige Ansätze beschränken sich auf die Auswahl von geeigneten Datenquellen. Es fehlt ein Ansatz, der die Erfordernisse der Datenaufbereitung bereits bei der Datensammlung berücksichtigt.
- Insbesondere bei der automatisierten Aktivitätserkennung mit Hilfe von KI wird vernachlässigt, dass deren Nutzung ein vorgeschaltetes Training der Daten erfordert. Das „Sammeln“ dieser Trainingsdaten in ausreichender Qualität ist entscheidend für die Aussagekraft des KI-Modells und damit auch für die Nutzung des Digitalen Zwillings.

2. **Datenaufbereitung:**

- In der Planungsphase erfolgt die Datenaufbereitung auf Basis von historischen Projekten und mit Hilfe von Wahrscheinlichkeitsverteilungen. Es existieren verschiedene Ansätze, um Ist-Daten zu sammeln und automatisiert für die Simulation aufzubereiten.
- Dabei werden überwiegend extern angebrachte Sensoren verwendet. Daten von vorhandenen Sensoren, die z. B. auf Basis von Telematikstandards bereits vorliegen, werden nicht ausreichend genutzt.

3. **Datenübertragung:**

- Für die Datenübertragung stehen verschiedene Informationsquellen zur Verfügung, die zur Ableitung des Baufortschritts genutzt werden. Diese Informationsquellen liegen jedoch in unterschiedlichen Formaten vor.
- Bisherige Ansätze im Zusammenhang mit Simulation zur Datennutzung vernachlässigen die automatisierte Übertragung von Daten und damit einen entscheidenden Baustein zur Entwicklung und Integration des Digitalen Zwillings in der Praxis.

4. **Datennutzung:**

- Die ereignisorientierte Simulation ist ein digitaler Lösungsansatz, um Bauprozesse durch die Optimierung von Materialflüssen zu verbessern. Aktuelle Forschungsansätze ordnen die Simulation dem Digitalen Zwilling zu. Die Simulation bildet die digitale Repräsentation zur Entscheidungsunterstützung für den Menschen. Digitale Technologien ermöglichen es, die Simulation durch Daten mit dem realen Bauproduktionssystem zu verbinden. Vorteile ergeben sich in der Planung durch eine erleichterte Modellierung und in der Ausführung durch die Verbesserung der Baufortschrittsvorhersage.
- Die Simulation findet zwar in der Forschung Anwendung, in der Baupraxis ist sie noch immer nicht angekommen. Gründe sind u. a. die Herausforderungen hinsichtlich der Modellierung des Bauproduktionssystems inkl. der Baulogistik. Existierende Vorgehensmodelle für die Simulation beziehen diese bauspezifischen Aspekte nicht mit ein und vernachlässigen die relevanten Bausteine für einen Digitalen Zwilling.

Insgesamt leitet sich aus diesem Bedarf der einzelnen Bausteine die folgende **Forschungslücke** für diese Arbeit ab:

- Es fehlt ein Vorgehensmodell zur Erweiterung der Simulation zum Digitalen Zwilling, das speziell auf die Optimierung des Bauproduktionssystems hinsichtlich baulogistischer Fragestellungen abzielt.
- Bisherige Arbeiten zur Umsetzung von Digitalen Zwillingen konzentrieren sich auf einzelne Bausteine des Digitalen Zwillings zur Datensammlung, -übertragung, -verarbeitung und -nutzung. Entscheidend für die Entwicklung eines Digitalen Zwillings ist allerdings die Betrachtung und Zusammenführung aller Komponenten.

- Forschungen haben erkannt, dass Vorgehensmodelle die Entwicklung und Integration von Digitalen Zwillingen für den Bauprozess unterstützen. Neben der technologischen Entwicklung soll das Vorgehensmodell daher auch bei der Integration des Digitalen Zwillings in die Baupraxis unterstützen.
- Digitale Zwillinge werden für konkrete Anwendungsbeispiele entwickelt. Bisherige Vorgehensmodelle für simulationsgestützte Digitale Zwillinge beziehen sich entweder auf andere Bereiche, wie die Intralogistik, oder nur auf einzelne Bereiche des Hoch- oder Tiefbaus. Ein Ansatz speziell für die Baulogistik fehlt.

3.3.2 Detaillierung der Forschungsfragen

Ausgehend von den Forschungsfragen in Abschnitt 1.4 dieser Arbeit wurde in den Kapiteln 2 und 3 der zugehörige Stand der Wissenschaft vorgestellt. Die daraus resultierende Forschungslücke wurde im vorangegangenen Abschnitt dargestellt und wird nun in die Forschungsfragen überführt.

Die **Hauptforschungsfrage** (*Wie kann ein Vorgehensmodell für die Entwicklung von Digitalen Zwillingen aus ereignisorientierter Simulation in Kombination mit Prozessdaten zur Optimierung des Bauproduktionssystems für die Baulogistik aussehen?*) beschäftigt sich mit der Konzeption eines modularen Vorgehensmodells zur Datensammlung, -aufbereitung, -übertragung und -nutzung, um Digitale Zwillinge in der Baupraxis zum Einsatz zu bringen. Basis des Digitalen Zwillings ist dabei die ereignisorientierte Simulation zur Datennutzung.

Durch die Beantwortung der **ersten Forschungsunterfrage** (*Welche Aspekte müssen bei der Umsetzung eines simulationsgestützten Digitalen Zwillings für die Baulogistik berücksichtigt werden?*) sollen repräsentative Merkmale und Merkmalsausprägungen von Bauprozessen und Digitalen Zwillingen im Allgemeinen identifiziert werden, um Rückschlüsse auf den Digitalen Zwilling für die Baulogistik zu ziehen. In Abschnitt 2.1 wurde der Betrachtungsgegenstand für diese Arbeit auf die Produktions- und deren Informationslogistik in der Planungs- und Ausführungsphase eingegrenzt. Überschneidungen zur Ver- und Entsorgungslogistik auf der Baustelle sind daher gegeben, nicht aber darüber hinaus. Optimierungen innerhalb der Baulogistik stehen in Wechselwirkung mit den Bauprozessen der Produktion. Die Grundlage zur Beschreibung von Bauprozessen bilden dabei die herkömmliche Kybernetik und Lean Construction. Durch die bewusste Definition des Bauproduktionssystems in Produkt, Prozess, Ressource und Einflussfaktor kann ein gezielter Einsatz digitaler Technologien zur Optimierung erfolgen. In Abschnitt 2.2 wurde aufgezeigt, dass in der Literatur noch keine Einigkeit über das Verständnis von Digitalen Zwillingen herrscht. Gerade im Bauwesen wird unter dem Digitalen Zwilling häufig BIM verstanden. BIM wird vornehmlich im Hochbau angewendet, sodass sich Defizite im Bereich des Tiefbaus aufzeigen. Die Möglichkeiten, die sich aus der Simulation ergeben, werden noch nicht ausreichend behandelt. Aktuelle Arbeiten streben die Betrachtung des Digitalen Zwillings als Vorgehensmodell an. Insgesamt

können vier Bausteine für das Vorgehensmodell für Digitale Zwillinge identifiziert werden, die als Grundlage für das zu entwickelnde Vorgehensmodell dienen sollen: (1) Datensammlung, (2) -aufbereitung, (3) -übertragung und (4) -nutzung. Die Datennutzung wird in dieser Arbeit ausschließlich die Simulation als digitale Technologie vorsehen. Neben der Entwicklung des Digitalen Zwillings aus verschiedenen digitalen Technologien, ist deren Integration in die Praxis anzustreben.

Die **zweite Forschungsunterfrage** (*Wie können simulationsgestützte Digitale Zwillinge für unterschiedliche Anwendungsbereiche der Baulogistik modelliert und umgesetzt werden?*) betrachtet die Aspekte, die bei der Umsetzung eines simulationsgestützten Digitalen Zwillings für die Baulogistik beachtet werden müssen. Die in Abschnitt 3.2.3 aufgeführten aktuellen Bestrebungen in der Literatur können bereits als Digitaler Zwilling betrachtet werden. Arbeiten, die auf Simulationen mit Einbindung von Ist-Daten basieren, wurden bisher nicht explizit unter dem Begriff des Digitalen Zwillings aufgeführt. Durch die Einbindung von Ist-Daten in die Simulation konnte jedoch bereits gezeigt werden, dass ein dynamischer Austausch zwischen physischem und virtuellem System stattfindet. Die unterschiedlichen Ausprägungen der Digitalisierung in den Anwendungsbereichen der Baulogistik erfordern eine bedarfsorientierte Entwicklung von Digitalen Zwillingen. Eine Unterscheidung erfolgt anhand der Kriterien Konnektivität, Autonomie und Information. In den Kapiteln 5 bis 7 werden daher Digitale Zwillinge aus drei unterschiedlichen Bereichen der Baulogistik vorgestellt: (1) Modul-, (2) Hoch-, und (3) Spezialtiefbau. Die Digitalen Zwillinge basieren auf realen Projekten mit unterschiedlichen Graden an Digitalisierung.

Die **dritte Forschungsunterfrage** (*Welche Effekte und Potenziale ergeben sich aus den simulationsgestützten Digitalen Zwillingen?*) beschäftigt sich mit der Diskussion des abgeleiteten Vorgehensmodells mit seinen vier Bausteinen. Die Simulation als Digitaler Zwilling ermöglicht die detaillierte Betrachtung und damit die Optimierung von Bauprozessen zur Produktivitätssteigerung innerhalb von Bauproduktionssystemen. Die Ergebnisse der drei Digitalen Zwillinge werden in den jeweiligen Kapiteln 5 bis 7 quantitativ belegt. Aufbauend auf diesen isoliert betrachteten Entwicklungen, erfolgt in Kapitel 8 eine übergreifende qualitative Bewertung des in allen drei Entwicklungen angewendeten Vorgehensmodells. Letztlich soll diese Arbeit dazu beitragen, die Integration in den Bauprozess und damit die Überführung und Nutzung des Digitalen Zwillings in die Praxis anhand von unterschiedlichen Anwendungsbeispielen aufzuzeigen.

4 Lösungsansatz – Vorgehensmodell für simulationsgestützte Digitale Zwillinge in der Baulogistik

4.1 Anforderungen an das Vorgehensmodell

Aus den bisherigen Erkenntnissen und dem aufgezeigten Forschungsbedarf in Abschnitt 3.3 ergeben sich die folgenden Anforderungen für ein Vorgehensmodell für simulationsgestützte Digitale Zwillinge in der Baulogistik.

Evolution der Simulation zum Digitalen Zwilling: Bisher konzentrieren sich die Bestrebungen für den Digitalen Zwilling stark auf BIM. Die Simulation hebt sich durch ihre Entscheidungsunterstützung bei Optimierungsproblemen ab [Ros-2015].

Berücksichtigung baulogistischer Randbedingungen: Ein Ansatz für einen Digitalen Zwilling zur Optimierung von Bauprozessen impliziert die Betrachtung von Bauproduktion und -logistik und deren Wechselwirkung [Voi-2014]. Die Baulogistik selbst kommt dabei in verschiedenen Anwendungen des Bauwesens vor. Das Vorgehensmodell sollte verschiedene Anwendungsbereiche, wie den Modul-, Hoch- und Tiefbau, abdecken, um der Interdisziplinarität der Baulogistik gerecht zu werden.

Methodisches Vorgehen: Basierend auf den Bausteinen für den Digitalen Zwilling ergeben sich die folgenden Anforderungen an deren Vorgehensweisen:

1. Grad der Informationsdichte bei der *Datensammlung*:
 - Bereits bei der Sammlung der Daten muss bedacht werden, welche relevanten Informationen aus dem betrachteten Bauproduktionssystem und der jeweiligen Bauphase abgeleitet werden sollen.
 - Die Datensammlung muss an der Anforderungsanalyse und der Zieldefinition ausgerichtet sein.
 - Bei der Auswahl der digitalen Technologien zur Datensammlung muss neben der technischen auch die organisatorische Einführung geklärt werden.
2. Grad der Autonomie bei der *Datenaufbereitung*:
 - Unterschiedliche Methoden von manuell bis (teil-)automatisiert sollen möglich sein.
 - Dabei gelten die jeweils gängigen Vorgehensweisen, z. B. für die statistische Aufbereitung von Verteilungen oder den Umgang mit KI.

3. Grad der Konnektivität bei der *Datenübertragung*:
 - Unterschiedliche Grade an Konnektivität von manuell bis kommunizierend, z. B. statisch über Tabellen, dynamisch über Informationssysteme, wie Datenbanken oder Middleware-Systeme, sollen abgebildet werden können, da der Grad der Digitalisierung nicht in jeder Anwendung bzw. in jedem System gleich ist.
 - Eine mögliche Skalierung des Digitalen Zwillings auf mehrere Datenquellen und damit die Möglichkeit, Daten nicht nur linear, sondern auch über verteilte Systeme, zu übertragen, soll berücksichtigt werden.
4. Grad der Modellierungstiefe bei der *Datennutzung*:
 - Die ereignisorientierte Simulation wird zur Datennutzung verwendet.
 - Die Modelle sind durchgängig und sowohl auf die Planung als auch auf die Ausführung anwendbar.
 - Je nach Problemstellung müssen unterschiedliche Modellierungstiefen gewählt werden können.
 - Entscheidend für die Modellierung ist, dass sie aufwandsarm und flexibel ist, um dem Unikatcharakter entgegenzuwirken und dennoch auf Veränderungen reagieren zu können [Abd-2020b].
 - Eine systematische Modellierung hilft, um die Zusammenführung von physischen und digitalen Systemen als Simulation umzusetzen und in die Praxis zu überführen [Abd-2020b].

Integration in die Baupraxis: Letztlich ist die Überführung in die Baupraxis wichtig. Dabei ist der Digitale Zwillinge als System zu betrachten. Auch wenn nicht alle Bausteine vollständig abgedeckt werden, müssen sie bedacht und deren Abhängigkeiten und Interaktionen ermöglicht werden. Bei der Entwicklung und Anwendung verschiedener digitaler Technologien als Digitaler Zwilling ist letztlich die Komponente Mensch zu beachten.

Diese Anforderungen dienen als Grundlage für das im nachfolgenden Kapitel 4.2 abgeleitete Vorgehensmodell. Gleichzeitig dienen sie als Kriterien für die Bewertung und den Vergleich der entwickelten Digitalen Zwillinge in der Baulogistik in Kapitel 5 bis Kapitel 8.

4.2 Ableitung des Vorgehensmodells

Basierend auf den Anforderungen leitet sich das folgende Vorgehensmodell für einen simulationsgestützten Digitalen Zwilling für die Baulogistik ab (siehe Abbildung 4-1).

Das Vorgehensmodell ist von der Autorin erstmals in [Fis-2020] veröffentlicht worden und diente als Grundlage für alle weiteren Veröffentlichungen [Fis-2021b; Fis-2021c; Fis-2021e; Fis-2021d; Fis-2021a; Fis-2021f; Fis-2022; Fis-2023b; Fis-2023a].

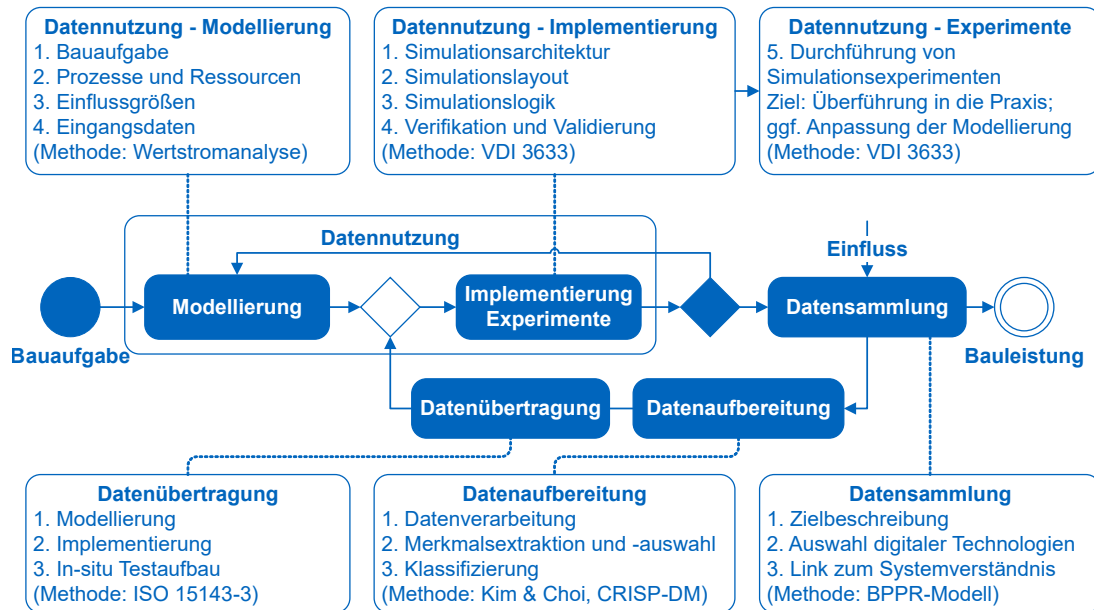


Abbildung 4-1: Vorgehensmodell für den Digitalen Zwilling in der Baulogistik (eigene Darstellung)

Das Vorgehensmodell setzt sich in Anlehnung an Feng et al. [Fen-2021] aus vier Bausteinen zusammen:

1. Datennutzung (Modellierung, Implementierung und Experimente);
2. Datensammlung;
3. Datenaufbereitung;
4. Datenübertragung.

Die Bausteine sind nach den Ansätzen der Kybernetik in Anlehnung an Günthner und Borrman [Gün-2011, S. 161] als Regelkreis angeordnet. Die Bauaufgabe als Eingangsgröße wird durch die Bauproduktionsplanung definiert und stellt den Soll-Zustand und die Zielgröße dar. Die Bauleistung ist die Regelgröße, die als messbares Ergebnis den Ist-Zustand des Bauproduktionssystems widerspiegelt. Einflussfaktoren, die in der Planungs- und Ausführungsphase auftreten, wirken als Störgrößen auf dessen Bauprozesse ein. Zur Erfassung des aktuellen Ist-Zustands dient die Datensammlung entlang der Regelstrecke, bei der relevante Informationen über den Bauprozess erfasst werden. Abweichungen werden über die Datenaufbereitung als Messglied erfasst. Die Datenübertragung ermöglicht die Rückkopplung in die Simulation zur Datennutzung, die als Regler auf den Bauprozess einwirkt.

Die Umsetzung der Entscheidung findet in der Praxis sowohl in der Planungs- als auch in der Ausführungsphase statt. Während dieser Phasen nimmt die Informationsdichte zu. Daraus ergeben sich Abweichungen in der Modellierung und der Implementierung. Die Durchführung von darauf basierenden Experimenten ermöglicht der Bauproduktionssteuerung verschiedene Szenarien vorab zu testen. Die Ergebnisse bilden die Grundlage für die Entscheidungsfindung.

Der regelbasierte Ansatz ist daher sowohl in der Planungs- als auch in der Ausführungsphase anzuwenden. Unterschiede ergeben sich in den zu sammelnden Daten. In der Planungsphase überwiegen digitale Informationen über das geplante Produkt. Soll-Daten aus historischen Projekten unterstützen. In der Ausführungsphase werden diese Soll-Daten durch Ist-Daten aus TaT-Systemen und Sensoren aktualisiert. Damit ist eine frühzeitige, durchgängige Einbindung von Simulation in die Baupraxis möglich.

Die verwendeten Methoden innerhalb der Bausteine ergeben zusammen eine schrittweise Vorgehensweise, die im Folgenden erläutert wird. Deren chronologische Reihenfolge kann variieren und iterieren. Die methodische Integration von Daten ist gleichzeitig die Abgrenzung von herkömmlichen Simulationsstudien, hin zum Digitalen Zwilling (siehe Abbildung 3-2).

Datennutzung (Modellierung)

Die Modellierung der Simulation ist ein wichtiger Bestandteil der Simulationsstudie (siehe Abschnitt 3.1.1). Die Modellierung ist eine vereinfachte Beschreibung des realen Systems. Sie ist die Grundlage für die spätere Implementierung. Gleichzeitig ist sie unabhängig von der zur Implementierung verwendeten Simulationssoftware zu verstehen [Pos-2016].

Gerade im Hinblick auf Digitale Zwillinge kommt der Modellierung eine vermittelnde Rolle zwischen dem Nutzen der Simulation durch die Einbindung von Daten und der Integration in die Baupraxis zu [Abd-2020a]. Die Modellierung legt die Basis für das Vertrauen in die späteren Simulationsergebnisse. Sie sorgt für das nötige Systemverständnis zur Optimierung von vorliegenden Fragestellungen. Die Modellierung bezieht auch mögliche Eingangsdaten mit ein und entscheidet über den Aufwand der späteren Simulationsstudien.

In diesem Vorgehensmodell wird die anerkannte Lean-Methode der Wertstromanalyse nach Rother und Shook [Rot-2009] zur Modellierung vorgeschlagen. Es ist essentiell, das betrachtete System, die **Baufgabe**, zu verstehen und den aktuellen Stand festzuhalten. Dazu gehören die Unterscheidung der **Prozesse (Logistik und Produktion)** und die Besonderheiten der **Ressourcen**. Aus der Systemanalyse werden die **Einflussgrößen** ersichtlich. Sie dienen als Parameter für die spätere Parameterstudie. Erste Lösungsansätze zur Optimierung des Systems, sogenannte Kaizen-Blitze, werden definiert. Beobachtungen vor Ort und Interviews (siehe „Go to Gamba“ in Abschnitt 2.1.3) unterstützen bei der Validierung der Wertstromanalyse. Bait et al. [Bai-2020] erweitern die Wertstromanalyse und erfassen neben den klassischen Kennzahlen der Produktion wie Produktions- bzw. Durchlaufzeiten, Anlagen- und Bestandsdaten auch Kranbewegungen und Schichtmuster.

Zur Systemanalyse gehört auch eine Übersicht über die erforderlichen **Eingangsdaten** für die Modellierung des Bauproduktionssystems (siehe Tabelle 4-1). Erforderliche Eingaben sind nach Feine et al. [Fei-2016]: Standort- bzw. baustellenspezifische Daten, die sich auf die Umgebung und das Layout des Projekts beziehen, bauaufgabenspezifische Daten, die

die Prozesse beschreiben, unternehmensspezifische Daten wie die Merkmale der verfügbaren logistischen Ressourcen und bautechnologische Daten, z. B. im Hinblick auf mögliche Lieferstrategien. Für die unternehmensspezifischen und bautechnologischen Daten eignen sich historische Eingangsdaten für zukünftige Projekte [Fei-2016]. Diese anfängliche Klassifizierung der Eingangsdaten erleichtert die spätere Skalierung hin zu einem modularen Katalog zur Übertragung auf weitere Bauprojekte.

Tabelle 4-1: Eingangsdaten für die Modellierung des Bauproduktionssystems (eigene Darstellung nach [Fei-2016; Gsc-2021])

Baustellenspezifisch (Produkt)	Baufaufgabenspezifisch (Prozess)	Unternehmensspezifisch (Ressource)	Bautechnologisch (Methode)
- Größe - Grundriss (z. B. Lage der Taktbereiche) - Aufteilungen in Geschosse im Hochbau oder Pfahlachsen im Spezialtiefbau - Entfernung zum Materiallager	- Terminplan - Projektstrukturplan - Materialbedarf und Abfallfraktion pro Aufgabe - Material-, Arbeitskosten pro Aufgabe	- Anzahl und Art vertikaler und horizontaler THMs inkl. logistischer Kenngrößen (z. B. Geschwindigkeit, Kapazität) - Art von LHMs (z. B. Größe, Wiederverwendbarkeit) - Art von TEs und Abfallfraktion von Materialien (z. B. Größe)	- Versorgung (z. B. Anlieferstrategie wie JIT oder Kitting) - Material (z. B. Lagerstrategie) - Abfall (z. B. maximaler Füllstand) - Koordination (z. B. Vergabe von LDL)

Ergebnis der Modellierung ist ein Modellierungskonzept auf Basis der Systemanalyse (siehe Vorgehensmodell nach VDI-Richtlinie 3633 [VDI-3633], zitiert nach [Gut-2017, S. 142 ff.]). Die Modellierung ist iterativ und kann im Laufe der Simulationsstudie angepasst werden [Rob-2015].

Datennutzung (Implementierung)

Die Implementierung stellt die Umsetzung des Modellierungskonzepts dar. Zur Orientierung dient die folgende Struktur zur Formalisierung:

- **Simulationsarchitektur** zur Beschreibung der Komponenten und Schnittstellen bzgl. der Modellanforderungen, wie Modularisierung;
- **Simulationslayout** zur Visualisierung;
- **Simulationslogik** für die Umsetzung der Bauprozesse und ihrer Abhängigkeiten.

Nach Rabe et al. [Rab-2008] stellt die Formalisierung einen Zwischenschritt zwischen dem Modellierungskonzept und dem eigentlichen ausführbaren Modell dar. Wie die Modellierung ist die Formalisierung streng genommen unabhängig von der Simulationssoftware. Allerdings sei an dieser Stelle angemerkt, dass die Modellierung und die Implementierung durch die Wahl der Simulationssoftware voneinander abhängen, z. B. bieten kommerzielle Simulationssoftware Standard-Bibliotheken, Daten-Schnittstellen oder grafische Darstellungen an. Bei der Auswahl der geeigneten Simulationssoftware muss auf diese Anforderungen des aufgestellten Simulationsmodells geachtet werden [Fra-2011, S. 17 f.]. Die Implementierung bezieht sich damit bereits auf die ausgewählte Software.

Eine Anforderung im Hinblick auf die Überführung der Simulation in die Baupraxis ist eine aufwandsarme Modellierung. Gerade im Hinblick auf den Unikatcharakter vieler Bauprojekte ist daher anzustreben, die Simulationsmodelle modular aufzubauen [Wim-2014]. Diese Einzigartigkeit betrifft insbesondere die baustellen-, bauaufgaben- und unternehmensspezifischen Einflussfaktoren, wie Standort, auszuführende Bauaufgabe und zur Verfügung stehendes Personal (siehe Tabelle 4-1). Die Logik dieser internen Prozesse ist auf ähnliche Projekte übertragbar [Beh-2015; Tom-1994].

Das implementierte System wird anschließend geprüft. Wichtigste Erkenntnis aus der **Verifikation und Validierung** von Simulationen in Produktion und Logistik [Rab-2008] bzw. [VDI-3633] ist, dass sie in allen Phasen des Vorgehensmodells stattfinden muss – sowohl beim Umgang mit den Daten auch als bei der ereignisorientierten Simulation.

Es ist zu beachten, dass die Simulation nicht als „Blackbox“ wahrgenommen wird [Beh-2015]. Zum einen werden die Möglichkeiten einer individuellen Modellanpassung eventuell nicht voll ausgeschöpft. Zum anderen muss ein ausreichendes Vertrauen in die Ergebnisse sichergestellt werden, um die Ergebnisse als Entscheidungsstütze zu verwenden.

Datensammlung

Die Datensammlung ist eng verknüpft mit der Systemanalyse für die Simulation. Aus der Systemanalyse geht die **Zielbeschreibung** hervor, aus der sich die benötigten Informationen, damit einhergehend die benötigten Daten und die dafür benötigte geeignete **digitale Technologie** ableiten lassen, z. B. die Aktivitätserkennung mit einer geeigneten Sensorik. Die Qualität und Menge der gesammelten Daten sind entscheidend für das spätere Ergebnis. Die Datensammlung erfolgt in der Planung und Ausführung.

Entscheidend dabei ist die frühzeitige Berücksichtigung der Anforderungen aus der Datenaufbereitung und -übertragung. Zur **Verknüpfung des System- und Technologieverständnisses** wird ein Bau-Produkt-Prozess-Ressourcen (BPPR)-Modell nach Vorbild des Produkt-Prozess-Ressourcen-Modells für das Maschinenwesen von Nielsen [Nie-2003] vorgeschlagen, um die Rollen und deren Prozesse festzulegen (siehe blaue Schwimmbahnen in Abbildung 4-2).

Das BPPR-Modell bildet die Komponenten des Bauproduktionssystems (siehe Abschnitt 2.1.3) als Schwimmbahnen im BPMN-Diagramm ab. Ausgehend vom herzustellenden Produkt, z. B. dem Pfahl (Bauteil) innerhalb einer Pfahlwand (Baelement), werden verschiedene Bauprozesse zur Herstellung dieses Produkts (z. B. Kellybohrverfahren oder Endlosschneckenbohrverfahren) abgebildet. Ein Bauprozess besteht aus verschiedenen Vorgängen, die wiederum aus Aktivitäten mit definiertem Start und Ende bestehen. Die Bauprozesse sind mit verfügbaren und benötigten Ressourcen (z. B. Drehbohrgerät, Radlader oder Kran) verknüpft. Für das BPPR-Modell werden die Materialflüsse der Ressourcen ergänzt, um

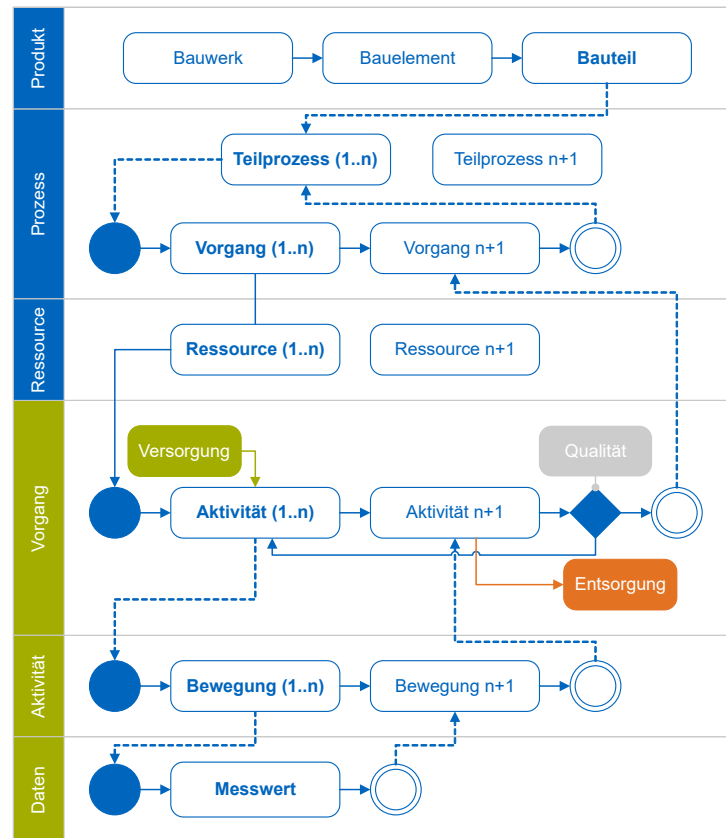


Abbildung 4-2: Bau-Produkt-Prozess-Ressourcen-Modell auf Grundlage von Nielsen [Nie-2003] (blaue Schwimmbahnen), ergänzt um baulegistische Vorgänge inkl. Materialflüsse (grün: Versorgung; orange: Entsorgung; grau: Qualitätskontrolle), Aktivitäten und zugehörige digitale Technologien zur Datensammlung (grüne Schwimmbahnen)

die ausgeführten Vorgänge auch aus baulegistischer Sicht zu beschreiben. Dazu gehören die Materialversorgung (grün), -entsorgung (orange) und die Qualitätskontrolle (grau). Die Notation orientiert sich an Nübel et al. [Nüb-2015]. Zusätzlich werden die Aktivität und die zugehörigen gesendeten Daten der Ressource, z. B. auf Basis von Bewegungen, mit aufgenommen, um die Aufgaben der digitalen Technologien zu erfassen. Folgende Fragen sollen mit dem BPPR-Modell beantwortet werden:

- Was ist das eigentliche Produkt?
- Mit welchen Prozessen kann dieses Produkt hergestellt werden?
- Welche Ressourcen sind dafür nötig? Gibt es Alternativen?
- Welche Daten sammeln diese Ressourcen bereits während der Bauphase?
- Bilden diese Daten bereits den gewünschten Materialfluss ab? Sind andere bzw. weitere Daten von anderen digitalen Technologien notwendig?
- Wie können diese Daten während der Planung und Ausführung gesammelt werden?

Dieses angepasste BPPR-Modell für die Baulegistik entspricht damit den Vorschlägen zur Gestaltung von zukunftsfähigen Produktionssystemen, die nach Bauernhansl [Bau-2021, S. 7] „Rollen und Prozesse für das Datenmanagement umfassen, um Transparenz und da-

tenbasierte Optimierung zu ermöglichen.“ Seine Kategorisierung ermöglicht ein effizientes Überdenken von Produkten sowie eine Rekonfiguration von Anlagen auf Basis der Modularität [Ock-2019]. Zusätzlich werden die baulegistischen Vorgänge und die zugehörigen digitalen Technologien mit aufgenommen (grüne Schwimmbahnen). Zum einen erschließt sich daraus die Systemsicht mit Produkt und ressourcenintensivem Prozess. Zum anderen werden die Möglichkeiten und Grenzen der eingesetzten oder geplanten digitalen Technologien ersichtlich. Die Ausweitung zu einem unternehmensspezifischen Katalog ermöglicht eine fortwährende Verwendung.

Datenaufbereitung

Ausgehend von den ausgewählten Daten leiten sich die Methoden der Datenaufbereitung ab. Für die Digitalen Zwillinge in der Baulegistik sind die Materialmengen und die Bearbeitungsdauern relevanter Vorgänge entscheidend. Liegen diese Zeiten bereits vor, reicht eine **Datenverarbeitung** aus, d. h. die relevanten Daten werden herausgefiltert und ggf. für die Simulation angepasst bzw. umstrukturiert [Gut-2017, S. 145].

Die Daten werden dazu statistisch als repräsentative Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen bzw. Wahrscheinlichkeitsverteilungen aufbereitet [Gut-2017, S. 145]. Die Auswahl der geeignetsten Verteilung für die gegebene Stichprobe kann graphisch oder auf Basis der Ergebnisse von Anpassungstests erfolgen [Ben-2013]. Die Anpassungstests bestimmen die Abweichungen der Wahrscheinlichkeitsverteilungen von der Häufigkeitsverteilung der Stichprobe.

Liegen die Bearbeitungszeiten noch nicht vor, wird eine Datenanalyse durchgeführt, um aus den vorliegenden Daten die relevanten Aktivitäten und deren Dauern zu erkennen. Wie bereits in Abschnitt 3 aufgeführt, existieren für Baugeräte unter dem Begriff der Aktivitätserkennung bereits verschiedene Ansätze basierend auf KI.

Bei der Aktivitätserkennung von Sensordaten mit Hilfe des überwachten ML erfolgt nach der Methode von Kim und Choi [Kim-2019] zunächst die Datenverarbeitung. Dazu gehört, dass die Sensordaten für das spätere Training der ML-Modelle den zu klassifizierenden Aktivitäten gegenübergestellt werden. Die Sensordaten werden anschließend von Ausreißern und Rauschen befreit. Außerdem werden sie skaliert, um die Größenunterschiede der unterschiedlichen Werte aufgrund von Einheiten auszugleichen. Basierend auf den so verarbeiteten Sensordaten erfolgt die **Merkmalsextraktion und -auswahl**, um weitere Merkmale künstlich zu extrahieren und schließlich für das Training auszuwählen.

Bei den DL-Ansätzen wird versucht, diese Datenverarbeitung und Merkmalsextraktion sowie -auswahl zu umgehen [Kim-2019]. Es wird angestrebt, Modelle zu finden, die die Sensordaten direkt verwerten können. Die CRISP-DM-Methode (engl. Cross-Industry Standard Process

Model for Data Mining) nach Chapman et al. [Cha-2000] betont neben der Entwicklung der Modelle auch deren unternehmerische Aspekte, wie die Wartung und den Betrieb solcher Modelle [Stu-2021].

Für die **Klassifizierung** werden geeignete Modelle implementiert. Sie werden anschließend mit den Sensor- und Aktivitätsdaten trainiert und validiert. Die trainierten Modelle werden dann mit unbekannten Sensordaten getestet und ihre Genauigkeit gegenüber dem Training und dem Test bewertet.

Datenübertragung

Die Einbindung der Daten erfolgt zyklisch, um die Simulation zu aktualisieren. Dabei kann zwischen statischen und dynamischen Daten und ihrer Übertragung differenziert werden. Die Zeit spielt eine untergeordnete Rolle. Ziel ist die Optimierung des Bauprozesses mit Hilfe der Simulation, wobei von keiner Echtzeitfähigkeit ausgegangen wird (siehe Abschnitt 3.1.1). Eine Datenübertragung in Stunden oder Tagen wird als hinreichend erachtet.

Je nach technischer Möglichkeit können die Daten automatisiert in Plattformen gesendet, weiterverarbeitet und in die Simulation übertragen werden. Aufgrund der Heterogenität im Bauwesen gibt es Bestrebungen, diese Datenübertragung interoperabel zu gestalten, z. B. über die ISO-Norm 15143-3 [ISO-15143-3] für die Telematik von Geräten zur Erdbewegung und dem Straßenbau. Die Umsetzung einer solchen Plattform erfolgt durch ihre **Modellierung und Implementierung**. Letztlich findet die Datenübertragung in Abstimmung mit den Schnittstellen der ereignisorientierten Simulation statt. Zur Validierung dieses Gesamtsystems wird ein **in-situ Testaufbau** angestrebt.

Datennutzung (Experimente)

Ausgehend aus den anfangs definierten Zielen werden die **Simulationsexperimente** definiert, durchgeführt und ausgewertet. Durch die Variation einzelner ausgewählter Parameter können deren Auswirkungen auf das Teil- oder Gesamtsystem analysiert werden. Diese Bewertung des Systems findet mit Hilfe der Simulation virtuell statt, d. h. ohne in den Betrieb eingreifen zu müssen. Die Bewertung der Ergebnisse findet zusammen mit den Expert*innen statt. Sie sind die Basis für die Entscheidungsfindung. Wichtig ist, dass die Ergebnisse im Hinblick auf die getroffenen Annahmen und Vereinfachungen diskutiert werden. Eine anwendungsgerechte Aufbereitung der Daten, z. B. durch Visualisierungen, hilft. Insgesamt ist dieser Prozess der Entscheidungsfindung und finalen Ableitung von Maßnahmen für die Praxis auf Basis der Ergebnisse aus den Experimenten iterativ.

Zusammenfassend baut das abgeleitete Vorgehensmodell auf bestehenden Methoden (z. B. Kybernetik und Lean Construction) und digitalen Technologien (z. B. Simulation und KI) auf und verknüpft diese. Anpassungen und Erweiterungen erfolgen insbesondere hinsichtlich der Übertragbarkeit in die Praxis der Baulogistik (z. B. BPPR-Modell).

Damit ist die erste Forschungsunterfrage *Welche Aspekte müssen bei der Umsetzung eines simulationsgestützten Digitalen Zwillings für die Baulogistik berücksichtigt werden?* beantwortet.

4.3 Auswahl der Anwendungsbeispiele

Im Folgenden wird die Vorgehensweise zur Anwendung des Lösungsansatzes erläutert. Die Anwendung des Lösungsansatzes dient der Beantwortung der noch offenen zweiten und dritten Forschungsunterfrage für die Umsetzung und Bewertung des vorgestellten Vorgehensmodells für die Baulogistik. Der Anwendungsbereich der Baulogistik erstreckt sich über alle Baugewerbe.

Exemplarisch werden in dieser Arbeit drei Anwendungsbeispiele näher betrachtet:

Anwendungsbeispiel 1: Produktionsanlage im **Modulbau**;

Anwendungsbeispiel 2: Innenausbau im **Hochbau**;

Anwendungsbeispiel 3: Pfahlherstellung im **Spezialtiefbau**.

Damit sind die zwei Bauhauptgewerbe, der Hoch- und Tiefbau, vertreten. Des Weiteren wird, neben den herkömmlichen Teilbereichen, die auf der Baustelle stattfinden, mit dem Modulbau ein Teilbereich aus der industriellen stationären Bauindustrie, abseits der Baustelle, abgedeckt. Insgesamt kann so zum einen auf die anwendungsspezifischen Besonderheiten von Digitalen Zwillingen eingegangen werden und zum anderen eine Übertragbarkeit und Allgemeingültigkeit auf weitere Anwendungsbereiche untersucht werden.

In den einzelnen Anwendungsbeispielen werden jeweils unterschiedliche Ausprägungen des Vorgehensmodells umgesetzt und bewertet. Die Reihenfolge entspricht den aufsteigenden Evolutionsstufen, in die die Simulation als Digitaler Zwilling eingeordnet werden kann (siehe Abbildung 4-3).

Im ersten Anwendungsbeispiel, dem Modulbau, werden die Bausteine für die Datennutzung und -sammlung betrachtet, im zweiten Anwendungsbeispiel, dem Hochbau, zusätzlich der Baustein für die Datenaufbereitung und im dritten Anwendungsbeispiel, dem Spezialtiefbau, folgt die Betrachtung aller Bausteine inkl. dem Baustein für die Datenübertragung. Demnach entspricht das erste Anwendungsbeispiel im Modulbau dem geringsten und das letzte Anwendungsbeispiel im Spezialtiefbau dem höchsten technologischen Grad an Information, Autonomie und Konnektivität.

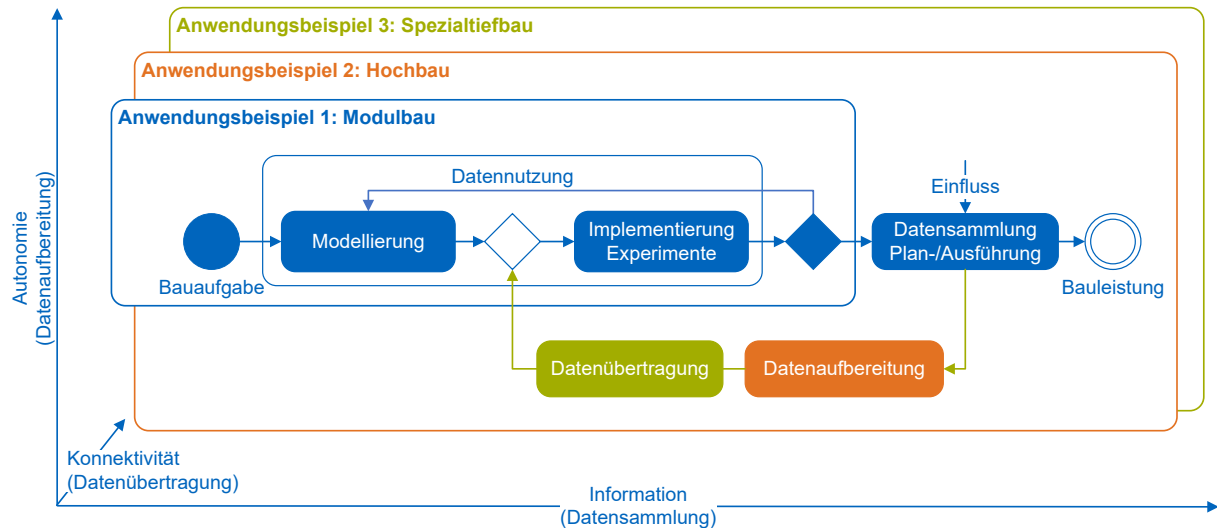


Abbildung 4-3: Einordnung der drei Anwendungsbeispiele in die Evolutionsstufen des Digitalen Zwillings (eigene Darstellung)

Neben der Betrachtung der technologischen Aspekte wird auch die Integration der Digitalen Zwillinge geprüft. Ziel ist es, durch das systematische Vorgehen ein Systemverständnis in allen drei Anwendungsbeispielen zu schaffen, um den Spalt zwischen Technologie- und Prozesswissen zu überwinden. Dazu dienen, neben den erzielten Ergebnissen, auch die Aufzählung der Herausforderungen bei der Entwicklung des Digitalen Zwillings und der Ausblick auf dessen nächste Evolutionsstufen.

5 Anwendungsbeispiel 1: Produktionsanlage im Modulbau

5.1 Einleitung

Ziel des Anwendungsbeispiels im Modulbau ist die Optimierung der gesamten Produktionsanlage inkl. der Produktion der einzelnen Bauteile und deren Zusammenbau zum Bauelement (Modul).

Das Anwendungsbeispiel entstand im Rahmen des Forschungsprojekts Bauen 4.0, gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (Förderkennzeichen 02P17D249), in Zusammenarbeit mit einem Bauunternehmen in Deutschland. Es basiert auf der von der Autorin betreuten Masterarbeit von Rodriguez Llorens [fml-2021g] und wurde gemeinsam in [Fis-2022] veröffentlicht.

Im Anwendungsbeispiel wird die Produktionsanlage des Bauunternehmens für das modulare Bausystem und ein zum Zeitpunkt des Projekts darin durchgeführtes Bauprojekt betrachtet. Die Arbeit entstand in enger Absprache mit der Produktionsleitung.

Für die Umsetzung des Anwendungsbeispiels wurde entsprechend dem Vorgehensmodell aus Abschnitt 4.2 vorgegangen (siehe Abbildung 5-1).

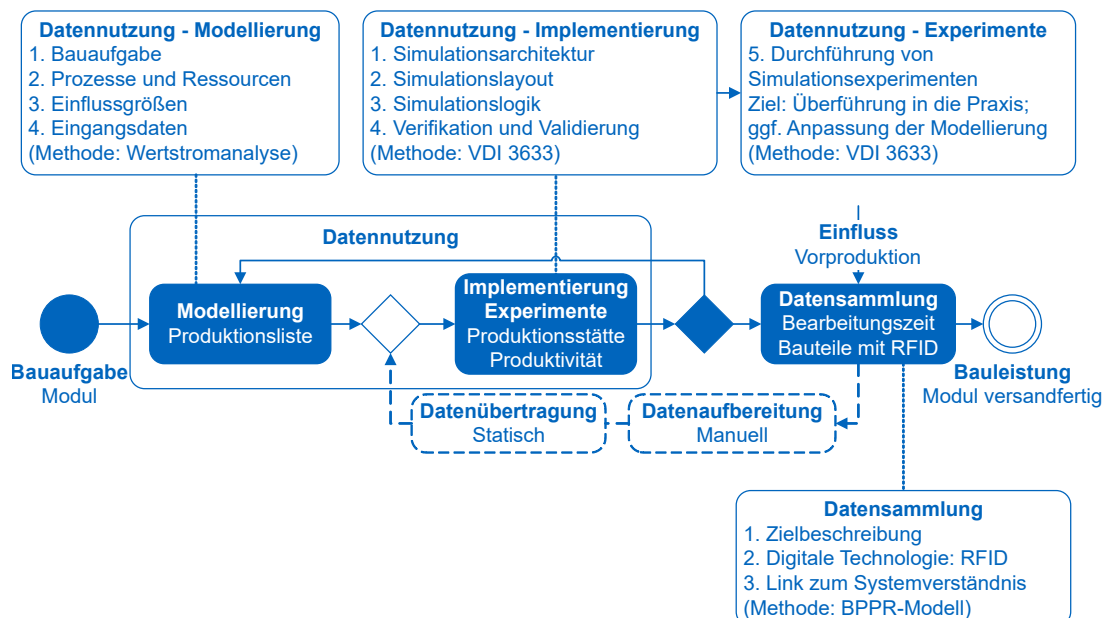


Abbildung 5-1: Bausteine für den Digitalen Zwilling im Modulbau (blau: umgesetzt; weiß: konzeptioniert; eigene Darstellung)

Die Bauaufgabe stellt die Produktion des Moduls dar. Die Bauleistung entspricht dem Durchsatz der Module bzw. der Anzahl an fertiggestellten und versandbereiten Modulen, um sie auf der Baustelle zum eigentlichen Bauwerk zusammenzubauen. Die Modellierung der Produktionsanlage erfolgt mit Hilfe der erweiterten Wertstromanalyse nach Bai et al. [Bai-2020]. Als Eingangsdaten dient der Modulplan bzw. die Produktionsliste der Module. Die Implementierung deckt drei Bereiche innerhalb der Produktionsstätte ab: (1) Rohbau, (2) Zwischenlager und (3) Montage. Die Produktionsreihenfolge wurde als optimal regelbasiert angenommen, was bis dato auf den Erfahrungen der Facharbeitenden basiert. Abgrenzend zu relevanten Forschungsansätzen in Abschnitt 3.2.3 in diesem Bereich wird damit auch der Einfluss der innerbetrieblichen Logistik auf die Produktion untersucht.

Innerhalb des Bausteins für die Datensammlung wird versucht einen möglichen Engpass durch die Vorverarbeitung eines Bauteils (Doppelwand) für die Montagelinie zu quantifizieren. Dazu wird ein RFID-Versuchsaufbau aufgezeigt. Aufgrund eines zu kurzen Versuchszeitraums und technischer Probleme bei der Versuchsdurchführung können die Daten nicht wie geplant manuell aufbereitet und statisch übertragen werden und stehen somit auch nicht für die Simulation zur Verfügung.

Trotzdem können in den durchgeführten Simulationsexperimenten anschaulich die Auswirkungen verschiedener Einflussfaktoren auf die Produktivität der Anlage gezeigt werden. In drei Experimenten können die folgenden Erkenntnisse für die Planung und Fertigung gezogen werden: (1) Die Vollausslastung der Betonierstation erhöht zwar den Durchsatz der Module, steht aber nicht proportional zum Personaleinsatz, (2) die Reduktion der THMs wirkt sich positiv auf den Gesamtdurchsatz aus und (3) auch die Doppelwand hat einen Einfluss. Der Versand, die Anlieferung und der Zusammenbau der hergestellten Module auf der Baustelle sind nicht Teil der Untersuchung.

Einordnung: Anwendungsbeispiel 1

Das erste Anwendungsbeispiel im Modulbau stellt somit die **erste Evolutionsstufe** für einen Digitalen Zwilling dar und zeigt die Umsetzung und Bewertung des Bausteins für die Datennutzung und -sammlung.

5.2 Modellierung

5.2.1 Überblick

Abbildung 5-2 zeigt das methodische Vorgehen für den Baustein der Datennutzung zur Modellierung der Simulation. Zunächst erfolgt die Beschreibung der Bauaufgabe, der Prozesse und Ressourcen und der Einflussgrößen. Schließlich erfolgt die Einordnung der Eingangsdaten hinsichtlich der relevanten Kriterien für die Modellierung der Produktionsanlage.

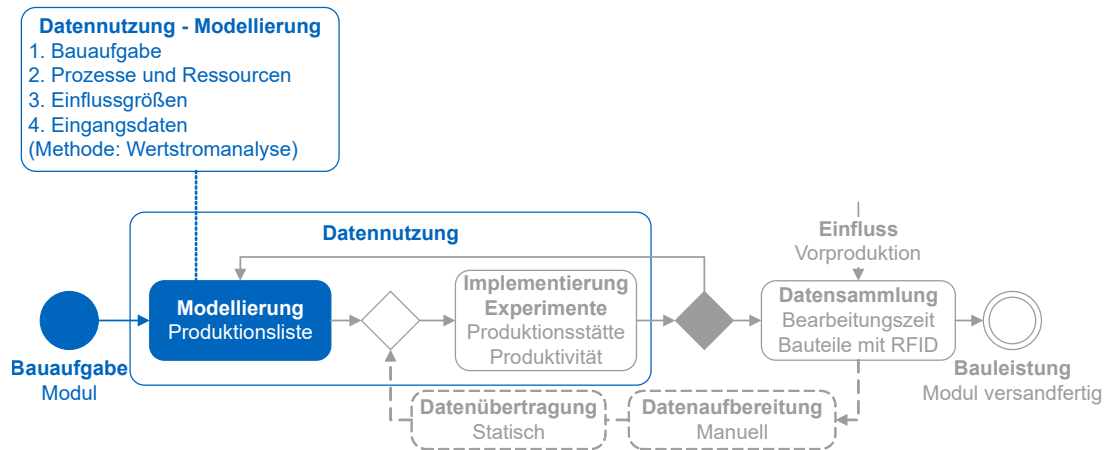


Abbildung 5-2: Baustein für die Modellierung des Digitalen Zwillings im Modulbau (blau; eigene Darstellung)

5.2.2 Bauaufgabe

Ein Modul besteht aus einem Boden, einer Decke und verschiedenen Wandtypen. Mehrere dieser Module werden auf der Baustelle zum eigentlichen Bauwerk zusammengebaut (siehe Abbildung 5-3).

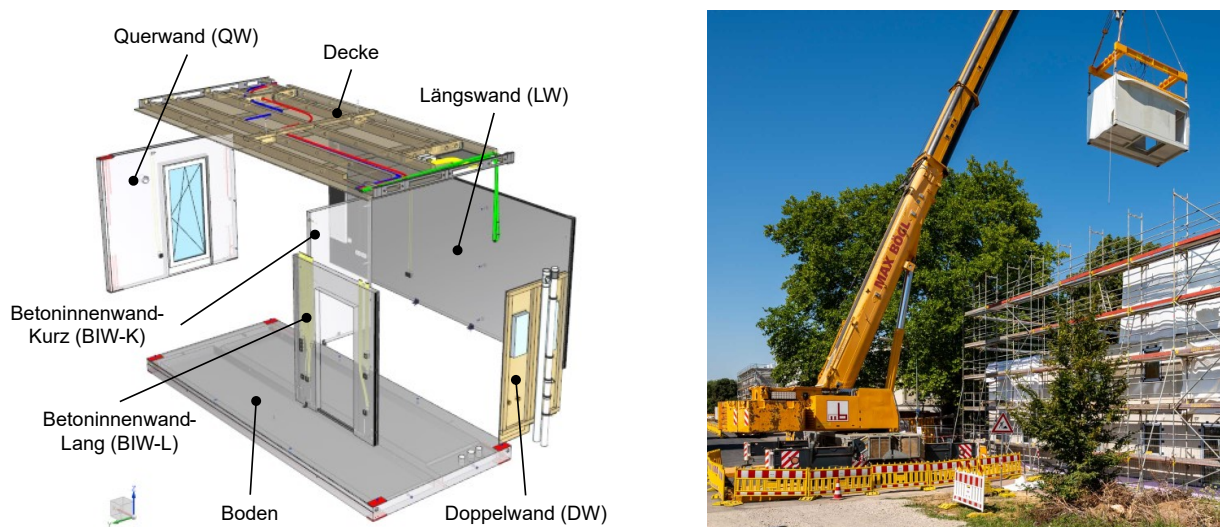


Abbildung 5-3: Modul (eigene Darstellung nach [Fis-2022]; Bildrechte: Max Bögl Modul AG [Max-2021; Max-2023])

Zu den Wandtypen zählen Quer- und Längswände. Für den Innenbereich wird eine dünnere Wandstärke verbaut (Betoninnenwand-Kurz/Lang). Für Module mit Bad, kurz Bad-Module, werden außerdem Doppelwände eingesetzt, die notwendige Installationen wie Abwasserrohre vorhalten. Diese Installationen werden aufgrund ihrer Komplexität und des Aufwands ausgelagert und in der Produktionsstätte fertig installiert.

Für die Produktion der Böden und Wandtypen kommt eine speziell entwickelte Schalungsvorrichtung zum Einsatz, der sogenannte Schmetterling (siehe Abbildung 5-4).

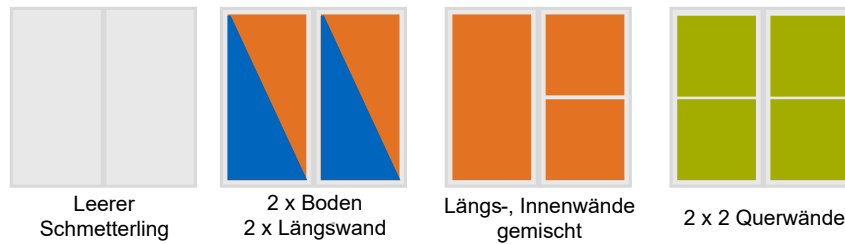


Abbildung 5-4: Möglichkeiten für die Belegung der Schmetterlinge mit den verschiedenen Bauteilen (blau: Böden; orange: Längs- bzw. Innenwände; grün: Querwände; eigene Darstellung nach [Fis-2022])

Diese spezielle Form ist gleichzeitig auch der Transportbehälter durch die Produktionsanlage (vor und nach der Betonage). Ein Schmetterling besteht aus zwei Formen, die in der Mitte miteinander verbunden sind. Aufgeklappt kann die Schalung und die Bewehrung für die zu betonierenden Bauteile eingesetzt werden. Zusammengeklappt wird der Schmetterling durch das Anheben der Verbindung in der Mitte. Aufgereiht und getrennt durch Trennwände kann so der Beton von oben verfüllt werden. Jeder Schmetterling kann je nach Bauteil zwei bis vier desselben Typs und derselben Höhe enthalten. Eine sortenreine Belegung ist somit für die Böden (blau) und Querwände (grün) notwendig. Die Längswände und die kurzen oder langen Innenwände (orange) weisen die gleiche Höhe bzw. Wandstärke auf und können somit gemeinsam gerüstet werden. Die Böden und Längswände belegen jeweils eine Hälfte eines Schmetterlings, die Querwände ein Viertel.

5.2.3 Prozesse und Ressourcen

Zur Aufnahme des Produktionssystems wird die Produktionsstätte mehrmals besucht. Einzelheiten und Kennzahlen werden in Gesprächen, auch mit den Arbeitenden vor Ort, sowie in Folgeterminen geklärt. Das Ergebnis ist die Wertstromanalyse in Abbildung 5-5.

Wie aus der Wertstromanalyse hervorgeht, wird die Produktionsplanung und -steuerung in der Produktionsstätte zentral elektronisch über ein ERP-System ausgeführt. Der rückläufige Pfeil zwischen den Schalungsstationen und der Betonierstation zeigt den Abstimmungsbedarf auf. Die dick gestreiften Pfeile weisen auf einen Push-Prozess des Materialflusses zwischen den Linien hin, während der Pfeil gegen den Uhrzeigersinn vor der Montagelinie einen Pull-Prozess anzeigt. Innerhalb der Montagelinie liegt eine gemischte Produktionsreihenfolge aufgrund unterschiedlicher Modulvarianten vor (OXOX).

Innerhalb der betrachteten Produktionsstätte werden vereinfacht drei Produktionsprozesse identifiziert (siehe Abbildung 5-6): (1) Rohbau, (2) Zwischenlager und (3) Montage. Die Rohbaulinie (blau) besteht aus mehreren Stationen zur Schalung und Betonage inkl. Puffer. Das Zwischenlager (grün) dient als Puffer für die Bauteile aus der Rohbaulinie und aus

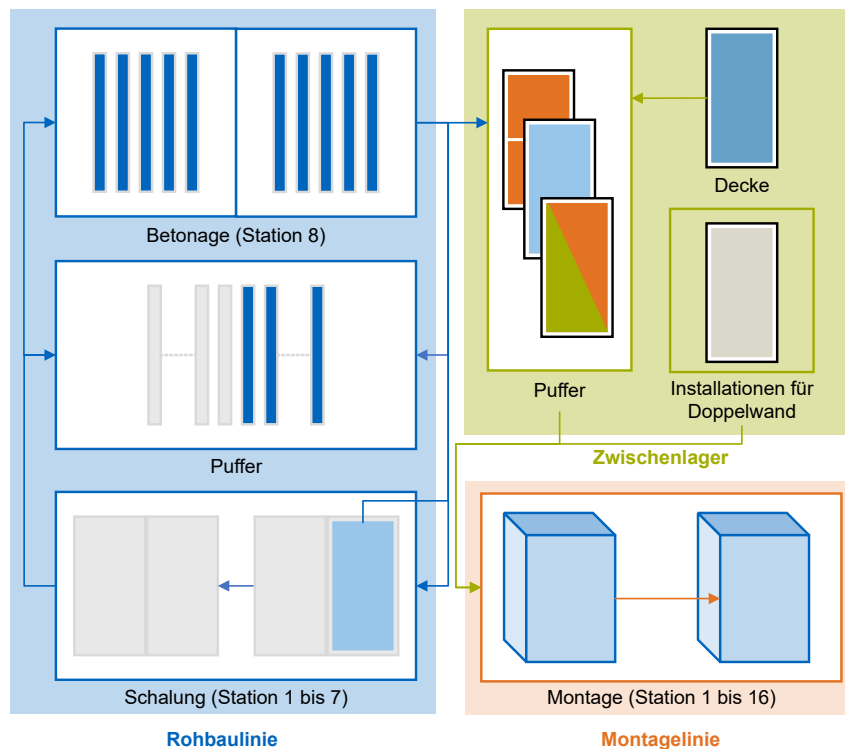


Abbildung 5-6: Schematische Darstellung der Stationen und der Materialflüsse bezogen auf die Schmetterlinge (blaue Pfeile), die Bauteile (grüne Pfeile) und die Module (orangene Pfeile) (eigene Darstellung nach [Fis-2022; fml-2021g])

Die vorbereiteten Schmetterlinge werden mit Hilfe eines Portalkrans von der Rohbaulinie zur Betonage transportiert. Die Betonage besteht aus vier Fächern, in denen jeweils bis zu fünf Schmetterlinge gleichzeitig betoniert werden können (Losgröße 20). Zum Zeitpunkt des Projekts wurden nur zwei der vier Fächer genutzt (Losgröße 10).

Nach einer bestimmten Aushärtezeit werden die betonierten Bauteile ausgeschalt. Dazu werden die Schmetterlinge mit Hilfe eines Portalkrans aufgeklappt. Die betonierten Bauteile werden dann mit Hilfe eines zweiten Portalkrans, der mit einem speziellen Hebwerkzeug aus Saugknöpfen ausgestattet ist, mit Unterdruck vom Schmetterling abgehoben.

Zwischen der Schalungslinie und der Betonierstation befindet sich ein Puffer, um die unterschiedlichen Geschwindigkeiten der Linien auszugleichen oder um auf eventuelle Störungen im Produktionsverlauf zu reagieren, z. B. aufgrund fehlender Bauteile in der Montagelinie.

Zwischenlager

Die betonierten und ausgehärteten Bauteile werden im Zwischenlager (grün) gelagert bis die Montagelinie (orange) die erforderlichen Bauteile zieht. Die leeren Schmetterlinge werden wieder zurück zu Station 1 der Rohbaulinie (blau) transportiert, wo sich der Kreislauf schließt. Damit entkoppelt das Zwischenlager die Rohbau- von der Montagelinie. Diese Entkopplung

ist allerdings notwendig, da zum einen die Belegung der Schmetterlinge beschränkt ist (siehe Abbildung 5-4) und zum anderen die Betonage eine volle Belegung mit Schmetterlingen erfordert.

Die Zwischenlagerung erfolgt auf Vertikallagern mit Fächern, auf denen die Bauteile beidseitig angelehnt werden und bei Bedarf zur Montage verbracht werden können.

Die Doppelwände und Decken werden von externen Produktionsstätten angeliefert und ebenfalls im Zwischenlager bis zum Bedarf in der Montagelinie gepuffert.

Montagelinie

Die Montage umfasst 15 Stationen: (1) Montage, (2) Fräsen, (3) Betonkosmetik, (4) Anstrich (Start), (5) Fenster und Türen, (6) Elektroinstallation (Start), (7) Heizungs- und Klimatechnik, (8) Fußbodenheizung, (9) Trockenestrich 1, (10) Trockenestrich 2, (11) Bodenbelag, (12) Elektroinstallation (Ende), (13) Anstrich (Ende), (14) Qualitätskontrolle, (15) Verpackung. Die Materialversorgung der einzelnen Stationen ist als Kanban-System ausgelegt.

In Station 1 werden die Bauteile aus der Rohbaulinie, die Decke und ggf. die Doppelwand zu einem Modul zusammengebaut. Dazu werden die rollbaren Lager des Puffers zur Station gebracht und von dort mit Hilfe eines Portalkrans verladen. Die Auswahl und Anordnung der Bauteile richtet sich dabei nach dem zu produzierenden Modul, z. B. kommt die Doppelwand nur bei Bad-Modulen zum Einsatz.

Nach dem Zusammenbau wird das Modul mit Hilfe des Portalkrans in eine speziell angefertigte Fräsmaschine (Station 2) gehoben. Die Fräsmaschine fräst Stahlplatten, die auf den Ecken der Bauteile oben angebracht sind, auf Maß, sodass die übereinandergestapelten Module auf der Baustelle im Lot sind. Von Station 2 wird das Modul auf ein Rollenförderband gesetzt. In Station 3 findet die Vorbereitung der Wände für den Anstrich statt, der in Station 4 beginnt. In Station 5 werden die Fenster und Türen eingebaut. In Station 6 beginnen die Elektroarbeiten. In Station 7 und 8 werden die Leitungen für die Heizungs- und Klimaanlage verlegt. In Station 9 und 10 findet der Einbau des Trockenestrichs statt. In Station 11 wird der (Fliesen-)Boden verlegt. In Station 12 werden die Elektroinstallation und in Station 13 der Anstrich beendet. In Station 14 findet eine abschließende Qualitätskontrolle statt, bevor das Modul in Folie witterungsfest verpackt (Station 15) und versendet wird.

5.2.4 Einflussgrößen

Die Einflussgrößen auf das vorliegende Produktionssystem gehen aus der Wertstromanalyse hervor:

- **Unterschiedliche Bearbeitungszeiten der Module:** Die Bad-Module haben eine höhere Bearbeitungszeit, was sich negativ auf die angenommene Taktzeit auswirkt;
- **Zuweisung der Modul- und Schmetterlingsreihenfolge:** Die festgelegte Reihenfolge der Module wirkt sich auf die Montagelinie selbst sowie auf die zu produzierenden Bauteile in der Rohbaulinie aus und damit gleichzeitig auf die festzulegende Konfiguration der Schmetterlinge;
- **Entkoppelte Produktionslinien:** Die verschiedenen Bauteile werden in verschiedenen Produktionslinien (Rohbaulinie, Zwischenlager für Decke und Doppelwand) gefertigt und in der Montagelinie zum Modul zusammengebaut.

Die Bearbeitungszeiten für die Module unterscheiden sich (siehe Abbildung 5-7). Sie ist für die Module ohne Bad kürzer (grüne Linie) als für die mit Bad (blaue Linie). Durch die höheren Bearbeitungszeiten für Bad-Module kommt es zu geplanten Verzögerungen im Taktplan (geplante Überschreitung). Im Gegensatz dazu überschreitet die Produktion von zwei Bad-Modulen nacheinander die durchschnittliche Taktzeit deutlich (kritische Überschreitung). Eine Gegenmaßnahme ist das Hinzuziehen weiterer Facharbeitenden. Falls diese Maßnahme nicht ausreicht, muss die Linie gestoppt werden oder es müssen kritische Module aus der Abfolge entnommen werden. Allerdings widerspricht diese Maßnahme den Lean-Prinzipien und ist zu vermeiden.

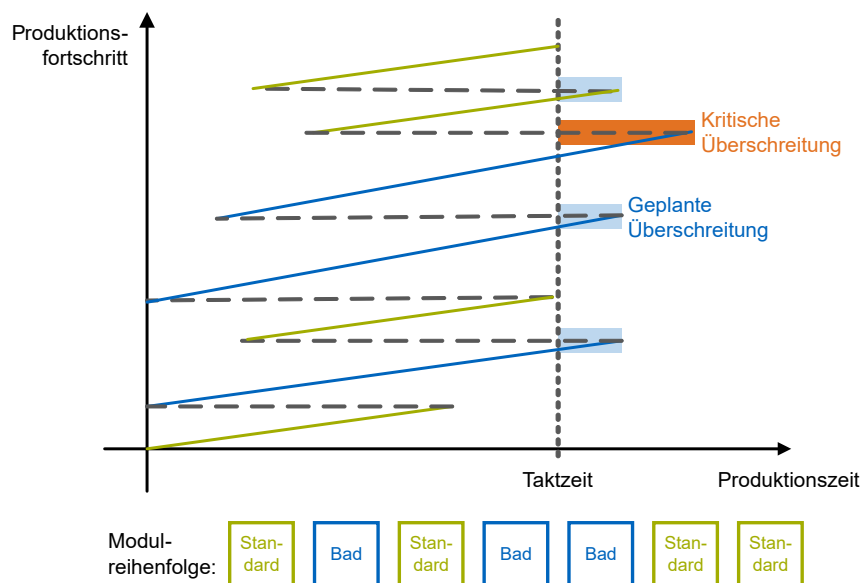


Abbildung 5-7: Schematische Verdeutlichung der Modulreihenfolge: Werden zwei Bad-Module hintereinander produziert, kommt es zum Nichteinhalten der Taktzeit (eigene Darstellung nach [fml-2021g])

Zum Zeitpunkt des Projekts erfolgte die Zuweisung der Module manuell. Eine manuelle Zuweisung stößt an Grenzen, insbesondere hinsichtlich einer zu erwartenden Zunahme der Komplexität bei zukünftigen Projekten. Liegt die optimale Modulreihenfolge fest, gilt es diese auf die Reihenfolge der zu produzierenden Wandtypen bzw. der Konfiguration der Schmetterlinge abzustimmen. Auch diese Zuweisung erfolgt manuell.

Diese Arbeit beschränkt sich jedoch auf eine festgelegte regelbasierte Reihenfolge auf Basis der Erfahrungswerte der zuständigen Facharbeitenden. Demnach wird maximal ein Bad-Modul in jeder Teilfolge von drei Modulen eingeplant. Ein exakter Lösungsansatz für die Optimierung der Schmetterlingsreihenfolge (siehe Kaizen-Blitz „Digitale Planung“ in Abbildung 5-5) wird in der von der Autorin betreuten Masterarbeit von Rodriguez Llorens [fml-2021g] vorgestellt.

Stattdessen wird im Folgenden der Einfluss der Produktionslinien (Rohbaulinie und Zwischenlager) auf die Montagelinie und damit auf das Produktionssystem untersucht, um die Auslastung und den Durchsatz zu erhöhen und die Verschwendung zu minimieren (siehe Kaizen-Blitze in Abbildung 5-5). Die Rohbau- und die Montagelinie folgen dem Prinzip der Fließbandarbeit. Die Anzahl der Produktionsschritte entspricht der Anzahl an Stationen. Aus produktionstechnischen Gesichtspunkten ist die Montagelinie taktgebend. Alle weiteren Produktionslinien sind ihr untergeordnet und richten sich nach ihrer Taktgebung. Zur Abstimmung und zum Ausgleich dient der Puffer vor der Montagelinie.

5.2.5 Eingangsdaten

Tabelle 5-1 klassifiziert die Eingangsdaten für die Produktionsanlage.

Tabelle 5-1: *Eingangsdaten für die Produktionsanlage (eigene Darstellung)*

Baustellenspezifisch (Produkt)	Baufaufgabenspezifisch (Prozess)	Unternehmensspezifisch (Ressource)	Bautechnologisch (Methode)
8 Stationen der Rohbaulinie (7 Schalungs- und 1 Betonierstation) 15 Montagestationen 1 Doppelwandstation	- Schichtmuster (8 h-Schicht) - Modulplan (regelbasierte Reihenfolge) - Taktzeit (1,5 h pro Modul) - Installationen an der Doppelwand (2 h)	31 THMs (Schmetterlinge) 2 Förderbänder (Rohbau- und Montagelinie, getaktet) 3 Krane (Betonage, Puffer, Montage) - Vertikallager (Kapazität: 10 Böden, 16 Längs- und Querwände, 20 kurze bzw. 10 lange Innenwände, 3 Doppelwände)	- Off-Site Produktion - Vorverarbeitung von Decken und Doppelwänden - Push-Prinzip in der Produktionslinie - Pull-Prinzip in der Montagelinie

Zu den baustellenspezifischen Daten gehören für dieses Anwendungsbeispiel der Aufbau und die Unterteilung der Produktionsanlage in mehrere Produktionslinien. Die unternehmensspezifischen Eingangsdaten für die Simulation erfassen die vorhandenen logistischen Ressourcen wie Schmetterlinge und Puffer. Auch festgelegt ist die Art und Richtung der Kran- und Modulbauanlage. Aus der Bauaufgabe leitet sich ein Modulplan ab. Die Taktzeit und das Schichtmuster werden zum Zeitpunkt des Projekts durch die maximal mögliche Durchlaufzeit der Produktionsanlage bestimmt und sind damit von den unternehmensspezifischen Daten abhängig. In Zukunft sollen diese Eingangsdaten aus der Bauaufgabe vorgegeben werden, um die geforderte Bauleistung bedienen zu können, d. h. ein Pull-Prinzip für die

Versorgungslogistik zur Baustelle hin. Vorteile ergeben sich hinsichtlich der Lagerkapazitäten und Wartezeiten der gefertigten Module. Innerhalb der Produktionsanlage sehen die bautechnologischen Daten vor, dass die Produktionslinien im Push-, die Montagelinie im Pull-Prinzip gestaltet sind.

Insgesamt leiten sich dadurch folgende Eingangsdaten für die Simulation ab:

- **Taktzeit:** Die Dauer zwischen dem Ein- und Austritt des Bauteils pro Station;
- **Bearbeitungszeit:** Die tatsächliche Arbeitszeit, die eine Person zur Bearbeitung in der Station benötigt;
- **THM:** Anzahl der sich im Einsatz befindenden Schmetterlinge;
- **Modulplan:** Produktionsliste für die Reihenfolge der Module inkl. der benötigten Modulelementtypen;
- **Schichtplan:** Anzahl der Schichten pro Produktionslinie (Ein- oder Zwei-Schicht-Betrieb), wobei ein Achtstundentag vorausgesetzt wird.

5.3 Implementierung

5.3.1 Überblick

Abbildung 5-8 zeigt das methodische Vorgehen für den Baustein der Datennutzung zur Implementierung der Simulation. Es wird die implementierte Simulationsarchitektur, -layout und -logik vorgestellt. Anschließend erfolgt die Verifikation und Validierung der Simulation.

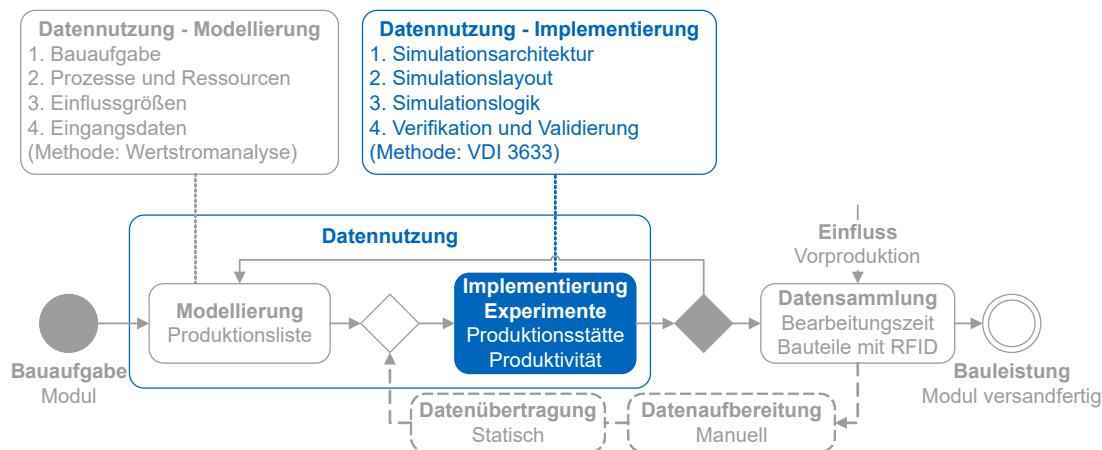


Abbildung 5-8: Baustein für die Implementierung des Digitalen Zwillings im Modulbau (blau; eigene Darstellung)

5.3.2 Simulationsarchitektur

Das Modell wird mit der Simulationssoftware Plant Simulation Version 15.1.0 umgesetzt. Fokus der Simulation ist eine wiederverwendbare Anwendung für zukünftige Projekte.

Als Bibliotheken dienen:

- **Schmetterlinge:** Die speziellen Schalungsvorrichtungen kommen nur in der Rohbaulinie zum Einsatz und dienen dort als Transport- und Produktionshilfsmittel zugleich;
- **Bauteile:** Für den Zusammenbau zum Modul werden ein Boden, eine Decke und verschiedene Wandtypen benötigt, wobei die jeweilige Konfiguration aus dem Modulplan hervorgeht;
- **Stationen:** Die Produktion der Wandtypen, ihre Vorhaltung und ihr Zusammenbau erfolgt auf spezifischen Stationen mit grundlegenden Funktionsweisen.

5.3.3 Simulationslayout

Das Simulationslayout basiert auf dem gegebenen Produktionslayout in Abbildung 5-6 und ist in Abbildung 5-9 dargestellt.



Abbildung 5-9: Ausschnitt des implementierten Simulationslayout des Produktionssystems (eigene Darstellung nach [fml-2021g])

Nur ausgewählte Stationen sind als Netzwerke abgebildet, um die Komplexität der Anwendung zu reduzieren. Jede Station der Rohbaulinie ist durch ein Netzwerk repräsentiert. Der Puffer in der Rohbaulinie ist aufgeteilt und in die Netzwerke der Stationen zur Abhebung der Bauteile (Station 1) und zur Betonage (Station 8) integriert.

Ebenfalls als Netzwerk modelliert ist der Puffer für die ausgeschalteten Bauteile und die Station für die Installationen an der Doppelwand.

Die Montagelinie ist in zwei Netzwerke aufgeteilt, um die Zusammenführung der Bauteile in Station 1 und die anschließenden Montagearbeiten von Station 2 bis 15 zu simulieren. Die Anlieferung der Decke ist im Netzwerk der Station 1 der Montagelinie abgebildet. Alle Stationen sind als Bearbeitungsstationen und alle Puffer als Puffer modelliert. Die Vorhaltung der Schmetterlinge in der Rohbaulinie erfolgt in Station 1 in sortenreinen Lagern.

Zum besseren Verständnis der Simulationsergebnisse stellt die implementierte Simulationsoberfläche die Zustände der Schmetterlinge in der Rohbaulinie (leer (Station 2), konfiguriert (Station 3), bewehrt (Station 4), vorbereitet (Station 5 bis 6), kontrolliert (Station 7), betoniert

(Station 1 bis 8)) sowie den Modultyp in der Montagelinie (mit oder ohne Bad) grafisch dar. Über die Bedienoberfläche können der Modulplan und die Schichtzeiten für die Rohbau- und Montagelinie pro Simulationslauf festgelegt werden. Die Schichten für die Schalungslinie und die Betonierstation sind entkoppelt.

Nach jedem Simulationslauf können die folgenden Ergebnisse im Leitstand eingesehen werden:

- Rohbaulinie: Bestand an Schmetterlingen, Auslastung der Betonage, Durchsatz an Bauteilen;
- Zwischenlager: Bestand an Bauteilen;
- Montagelinie: Durchsatz an Modulen.

5.3.4 Simulationslogik

Die Schalungsstationen sind Teil einer Förderbandanlage im Sinne einer Fließfertigung, daher sind die Ein- und Ausgänge der Netzwerke miteinander verbunden. Die Schmetterlinge bilden die THMs. Einzelne Bearbeitungsschritte können nicht übersprungen oder gepuffert werden, d. h. ein Schmetterling verweilt so lange auf seiner Station bis er bearbeitet wurde und die vorgelagerte Station frei ist.

Die Festlegung der Konfiguration der Schmetterlinge nach Abbildung 5-4 findet bei der Bewehrung (Station 3) statt. Sie richtet sich nach dem Modulplan. Nach ihr wird für alle vorhandenen Schmetterlinge ein frühestes Fälligkeitsdatum (engl. Earliest Due Date) bestimmt. Das Attribut wird dem jeweiligen Schmetterling zugeteilt. Die Schmetterlinge werden in aufsteigender Reihenfolge sortiert in die Rohbaulinie geschickt. Sind alle Bauteile aus dem Modulplan produziert, wird von vorne begonnen. Die Produktion wird erst nach Erreichen der vorgegebenen Zeit beendet.

Die Belegung der Schmetterlinge erfolgt nach der Belegung in Abbildung 5-4. Zunächst ist der Schmetterling leer. Danach wird der Modulplan zeilenweise nach dem benötigten Bauteil abgefragt. Wird z. B. ein Boden benötigt, wird ein Schmetterling mit zwei Böden gerüstet. Wird der nächste Boden benötigt, wird kein Schmetterling dafür gerüstet, da der benötigte Boden aus dem vorhergehenden Schmetterling hervorgeht. Das Vorgehen ist für die Querwände gleich, mit der Ausnahme, dass die nächsten drei Querwände übersprungen werden, bis wieder ein Schmetterling mit vier Querwänden gerichtet wird.

Sobald die Schmetterlinge für die Betonage vorbereitet sind, werden sie von einem Portalkran vom Förderband genommen. Die Priorisierungsregeln des Portalkrans sind wie folgt, um den Fluss bei der Rohbaulinie möglichst wenig zu stören:

1. Abhebung von fertig betonierten Schmetterlingen aus der Betonage (Station 8) für die Ausschalung (Station 1);

2. Entleerung der Betonage und Zwischenlagerung im Puffer;
3. Wiederbefüllung der Betonage.

Die Umsetzung des Portalkrans und dessen Steuerung erfolgt über Arbeitende mit einer zentralen Broker-Steuerung. Pro Anfahrtspunkt gibt es einen Arbeitsplatz. Sobald Schmetterlinge zum Transport bereit sind, wird eine Anfrage an die Broker-Steuerung der Arbeitenden gestellt. Die Aufgabe mit der höchsten Priorität wird zuerst zugewiesen und vom Arbeitenden als Portalkran ausgeführt. Nach erfolgreicher Ausführung wird die Aufgabe gelöscht und die nun am höchsten priorisierte Aufgabe vergeben.

Die Betonierstation ist als Parallelstation modelliert. Sie beginnt sobald gleichzeitig zehn Schmetterlinge in der Station sind. Werden Schmetterlinge während der Betonage fertig und passieren die Endkontrolle der Rohbaulinie, werden die Schmetterlinge in den Puffer gehoben. Dort erfolgt eine Sortierung der Schmetterlinge in aufsteigender Reihenfolge nach ihrem Fälligkeitsdatum. Nach der Betonage werden die Schmetterlinge nach den Prioritätsregeln des Portalkrans auf Station 1 zum Ausschalen gehoben. Sind alle Fächer belegt bzw. sind die festgelegten Höchstbestände einzelner Bauteile erreicht, wird die Bearbeitung dieser Bauteile in der Rohbaulinie zurückgestellt bis wieder Kapazität frei ist.

Die Montage der Module startet, sobald alle benötigten Bauteile nach dem Modulplan in den Puffern verfügbar sind. Dazu zieht Station 1 die benötigten Bauteile nach dem Modulplan aus den Vertikallagern. Doppelwand und Decke werden nach Bedarf erzeugt. Um die Daten von der Doppelwand zu berücksichtigen, wurde separat eine Quelle, die in einen Puffer führt, modelliert. Die Montagelinie ab Station 2 folgt der gemessenen Taktzeit und dem Pull-Prinzip aus der Wertstromanalyse (siehe 5-5 und Tabelle 5-1). Damit sind keine Puffer zwischen den Stationen notwendig. Die logistische Materialversorgung der Montagelinie als Kanban-System wird als ideal betrachtet.

5.3.5 Verifikation und Validierung

Zur Verifikation und Validierung wird ein Referenzmodell festgelegt. Dieses Referenzmodell bildet den aktuellen Stand in der Produktion ab:

- Schmetterlinge im Umlauf: 31;
- Betonage: 5 Schmetterlinge pro Fach, 2 von 4 Fächern in Betrieb;
- Bearbeitungsdauer Doppelwand: 2 h;
- Simulationszeit: 365 d.

Abbildung 5-10 zeigt die Auslastung aller Stationen. Der Fokus liegt auf den Stationen der Rohbaulinie. Jede Station wird nach ihrem Zustand in arbeitend, wartend (auf vorgelagerte Station) und blockiert (auf nachgelagerte Station) eingeteilt.

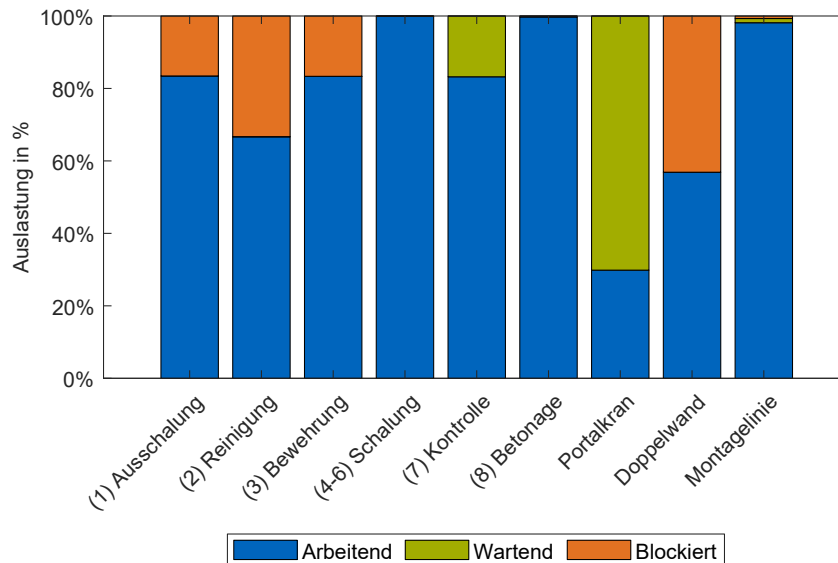


Abbildung 5-10: Auslastungsdiagramm des Produktionssystems (eigene Darstellung nach [fml-2021g])

Die Auslastungen der Betonierstation in der Rohbaulinie und in der Montagelinie sind maximal. Gerade bei den einzelnen Stationen der Rohbaulinie zeigt sich vor den Stationen der Schalung ein Aufstauen. Die vorgelagerten Stationen, Ausschaltung, Reinigung und Bewehrung (Stationen 1 bis 3), sind zu 15 % bis 35 % blockiert. Die nachgelagerte Station der Qualitätskontrolle hingegen wartet auf die Schmetterlinge aus den Stationen der Schalung. Die Doppelwand ist fast die Hälfte der Zeit durch die Montagelinie blockiert (57 %). Diese Ergebnisse decken sich mit den Beobachtungen der Produktionsleitung und seinem Team.

Abbildung 5-11 unterstreicht die Beobachtungen mit den in der Simulation gemessenen Wartezeiten bezogen auf die Betonierstation.

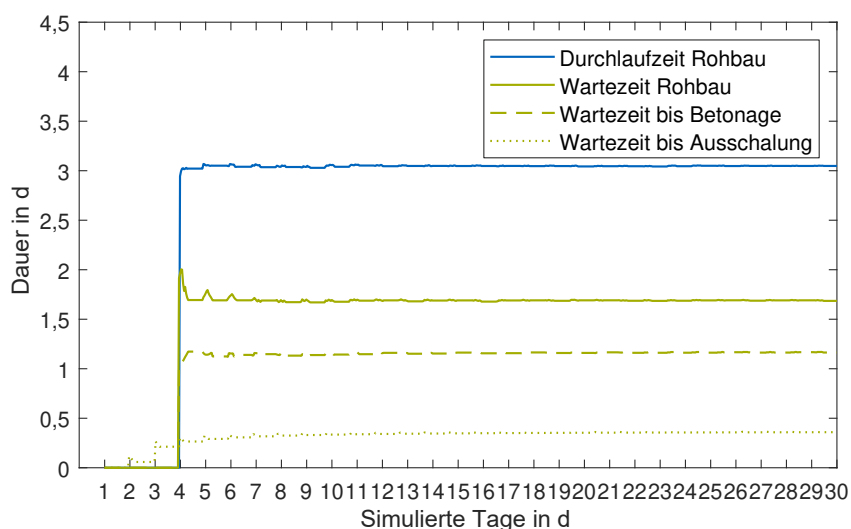


Abbildung 5-11: Durchschnittliche Durchlauf- und Wartezeit der Schmetterlinge in der Rohbaulinie (eigene Darstellung nach [fml-2021g])

Das Ergebnis zeigt eine Anlaufzeit der Simulation von vier Tagen. Diese Anlaufzeit entspricht der Produktionszeit eines Bauteils innerhalb der Rohbaulinie. In Summe verbringt der Schmetterling drei Tage in der Rohbaulinie (blaue Linie). Davon sind 1,6 Tage (53 %) Wartezeit (grüne Linie). Diese Wartezeit ist zum einen auf das Warten im Puffer vor der Betonierstation (0,4 d; gestrichelte Linie) und nach ihr (1,2 d; gepunktete Linie) zurückzuführen.

Weiterhin wird die Entwicklung des Bestands an Schmetterlingen in der Rohbaulinie untersucht (siehe Abbildung 5-12).

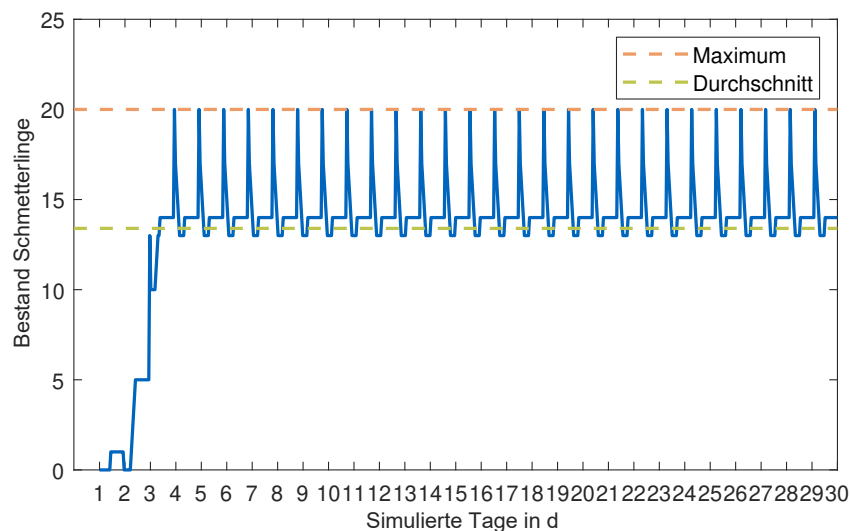


Abbildung 5-12: Vergleich des Bestands an Schmetterlingen im Puffer der Rohbaulinie (eigene Darstellung nach [fml-2021g])

Ab Tag 4 nähert sich der Bestand im Puffer einem Grenzwert von im Durchschnitt 14 Schmetterlingen an. Dabei schwankt der Bestand zwischen einem Minimum von 13 und einem Maximum von 20 Schmetterlingen. Diese Schwankungen ergeben sich aus der Betonage und entsprechend auch Aushärtung von zehn Schmetterlingen gleichzeitig (Losgröße 10). Da immer nur ein Schmetterling ausgeschalt werden kann, werden die restlichen Schmetterlinge (priorisiert) zunächst im Puffer zwischengelagert. Dieses Maximum gleicht sich wieder aus, da die Schmetterlinge zur Betonage (Station 8) bzw. sobald sie frei sind zur Ausschabung (Station 1) umgelagert werden. Der Mittelwert von 14 Schmetterlingen liegt am erwarteten Wert, der in den Gesprächen mit dem Industriepartner bestätigt wird.

Das Boxplot-Diagramm in Abbildung 5-13 gibt die Häufigkeitsverteilung für jedes Bauteil im Puffer über den Simulationszeitraum von 30 Tagen an.

Die Querwände werden am häufigsten gepuffert. Das liegt daran, dass die Schmetterlingskonfiguration immer vier Querwände pro Schmetterling vorsieht (siehe Abbildung 5-4). Auch die kurzen Innenwände kommen in Losgrößen von 2 oder 4 vor. Pro Modul wird immer nur eine kurze Innenwand benötigt, sodass immer mindestens eine davon im Puffer verbleibt. Die übrigen Bauteile werden häufiger bzw. regelmäßiger benötigt, was zu kürzeren Pufferzeiten führt.

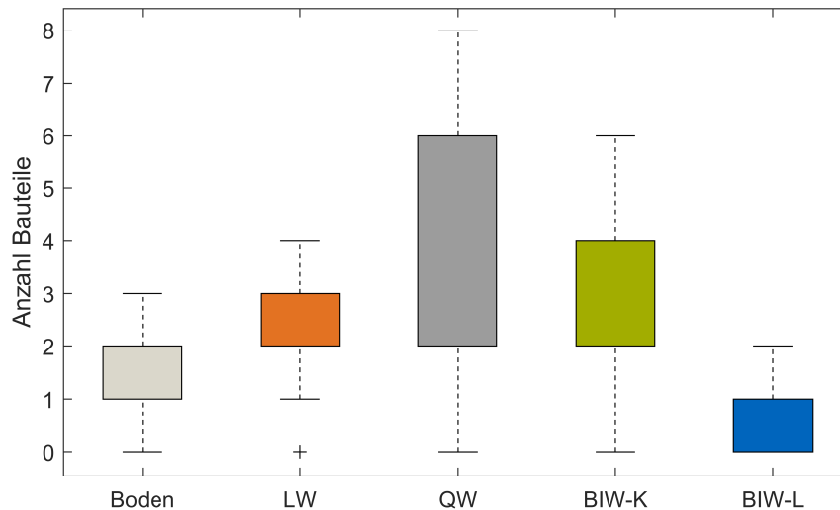


Abbildung 5-13: Boxplot-Diagramm der Pufferbelegung pro Bauteil zur Validierung der Simulation (Abkürzung zu QW: Querwand, LW: Längswand, BIW-K/L: Betoninnenwand-Kurz/Lang; eigene Darstellung nach [fml-2021g])

Die Ergebnisse der Durchsatzanalyse der Montagelinie ist in Abbildung 5-14 zu sehen, wobei sich die Wartezeit auf das Zwischenlager und den Puffer in der Rohbaulinie bezieht.

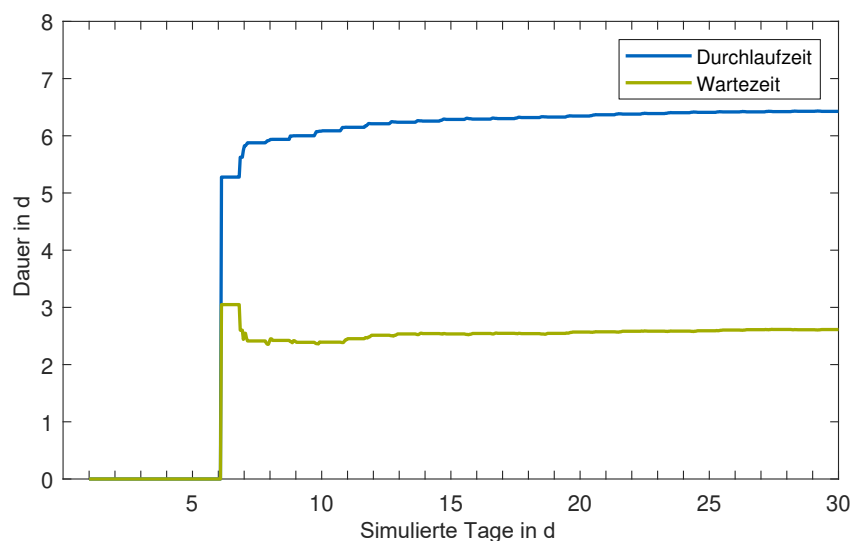


Abbildung 5-14: Durchschnittliche Durchlauf- und Wartezeiten in der Montagelinie (eigene Darstellung nach [fml-2021g])

Auch hier spiegelt die Anlaufzeit der Simulation die Produktionszeit eines Moduls von sechs Tagen wieder. Die durchschnittliche Durchlaufzeit der Module konvergiert nach einer anfänglichen Vorlaufzeit von ca. 25 Tagen zu einem Grenzwert. Insgesamt wird ein Modul ab Produktion seiner Bauteile bis zum Verlassen der Montagelinie in 6,4 Tagen produziert. Die durchschnittliche Wartezeit, bestehend aus dem Puffer in der Betonierstation und dem Zwischenlager, beträgt 2,6 Tage. Das Verhältnis von durchschnittlicher Warte- zu Durchlaufzeit beträgt 40,6 %.

Die Durchsatzanalyse der Anzahl der pro Tag produzierten Module ist in Abbildung 5-15 für den gesamten Simulationszeitraum von einem Jahr dargestellt.

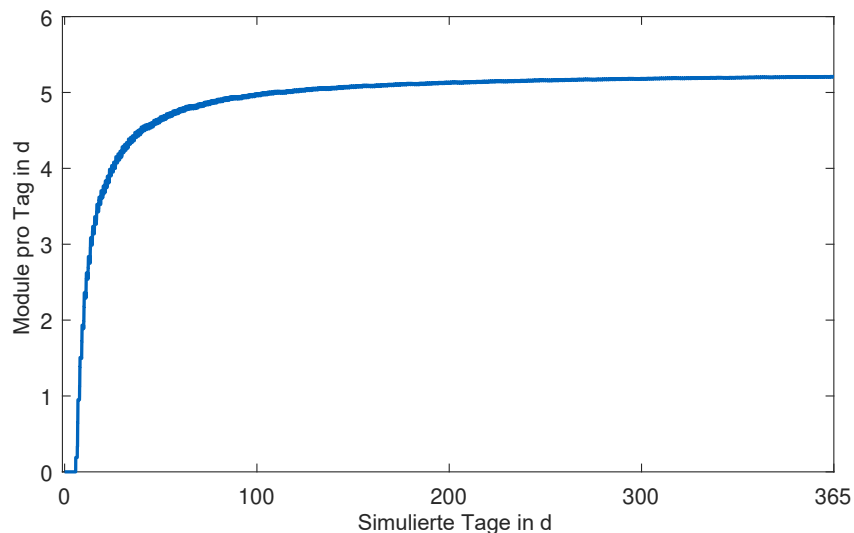


Abbildung 5-15: Durchsatz der Module pro Tag (eigene Darstellung nach [fml-2021g])

Nach der Vorlaufzeit der Simulation nähert sich der Durchsatz dem Grenzwert von 5,2 Modulen pro Tag an. Das entspricht der Schichtzeit von 8 Stunden im Verhältnis zur Taktzeit von 1,5 Stunden.

Die Verifikation und Validierung hat gezeigt, dass die Simulation das vorliegende abzubildende Produktionssystem hinreichend genau wiedergibt. Die Simulation wird damit als Referenzmodell für die folgenden Abschnitte herangezogen.

5.4 Datensammlung

Abbildung 5-16 zeigt das methodische Vorgehen für den Baustein der Datensammlung.

Die Zielbeschreibung erfolgt auf Basis von Gesprächen mit dem Industriepartner. Daraus geht hervor, dass die Dauer für die Installation der Doppelwand unbekannt ist, was einen möglichen Engpass für das Produktionssystem darstellt. Die Doppelwand wird nur für die Bad-Module benötigt. Mögliche Verzögerungen bei der Installation haben einen Einfluss auf die Montagelinie. Die Bearbeitungszeit der Installation der Doppelwand wird daher als kritisch angesehen und für die Implementierung des TaT-Systems ausgewählt, um diese Annahme zu quantifizieren.

Der Versuchsaufbau für das TaT-System ist in Abbildung 5-17 dargestellt. Insgesamt kommen zehn passive RFID-Tags (1) und zwei Lesegeräte (2a, 2b) zum Einsatz.

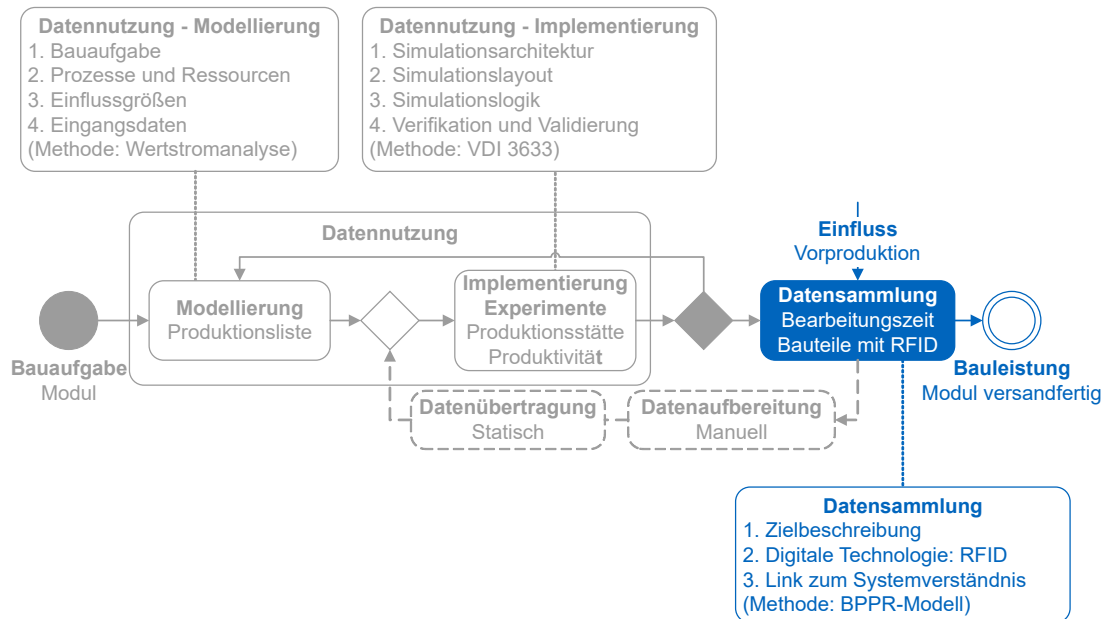


Abbildung 5-16: Baustein für die Datensammlung am Digitalen Zwilling im Modulbau (blau; eigene Darstellung)

Das BPPR-Modell in Abbildung 5-18 integriert die benötigten Vorgänge zur Erfassung der Doppelwand mit Hilfe des TaT-Systems mit dem vorliegenden Produktionssystem. Das betrachtete Produkt ist die Doppelwand. Ziel ist die Erfassung der Bearbeitungsdauer innerhalb der Station (Ressource) zur finalen Bereitstellung in der Montagelinie. Bedingt durch die externe Vorproduktion der Doppelwand sieht der Vorgang vor, dass die RFID-Tags temporär installiert werden.

Die RFID-Tags werden beidseitig an den Doppelwänden befestigt (grün hervorgehobener Vorgang), sobald diese angeliefert werden. Nach ordnungsgemäßer Installation und Abnahme der Doppelwand werden sie beim Austreten aus der Station wieder entfernt (orange hervorgehobener Vorgang). Die Lesegeräte sind fix an den beiden Enden des Vertikallagers befestigt. Ihr Erfassungsbereich beträgt 2 m. Innerhalb dieses Bereichs wird der RFID-Tag erfasst und ein Zeitstempel generiert. Die Datenübertragung erfolgt über Kabel an einen Rechner.

Der freigegebene Versuchsaufbau wurde zu zwei Wochen bzw. zehn Arbeitstagen festgesetzt. In diesem Zeitraum kann theoretisch ein Datensatz von bis zu 40 Bearbeitungsdauern aufgebaut werden, wenn eine Bearbeitungszeit von zwei Stunden pro Doppelwand angesetzt wird und somit vier Doppelwände in einer 8 h-Schicht fertiggestellt werden können. Allerdings ist dieser Zeitraum selbst unter optimalen Bedingungen sehr begrenzt, um einen wirklich repräsentativen Datensatz zu sammeln, da die Varianz der Produktionsbedingungen über längere Zeiträume hinweg nicht ausreichend abgebildet werden kann.

Die Durchführung der Versuche wurde zusätzlich durch technische Probleme erschwert. Die manuelle, temporäre Anbringung führte im laufenden Betrieb zum Verlust der RFID-Tags, was

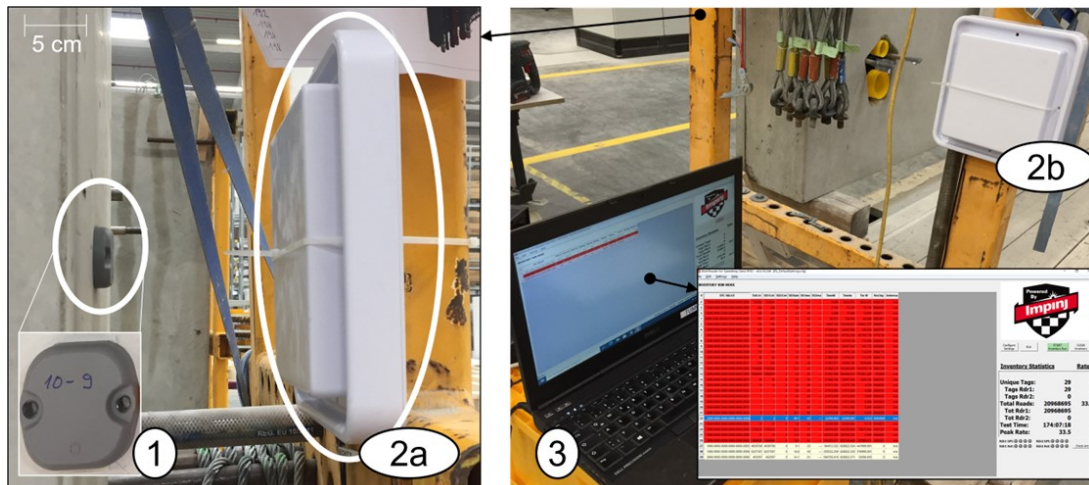


Abbildung 5-17: Versuchsaufbau zur Datensammlung von Warte- und Durchlaufzeit der Doppelwände: (1) aufgeklebter RFID-Tag auf der Doppelwand; (2a) gegenüberliegende Lesegeräte am Eingang der Station; (2b) Lesegerät am Ausgang der Station; (3) Verbundener Rechner zum Auslesen des Zeitstempels (eigene Darstellung nach [fml-2021g])

eine kontinuierliche Datenerfassung verhinderte. Gleichzeitig verfügten die passiven RFID-Tags über eine zu geringe Speicherkapazität. Diese technischen Probleme beeinträchtigten die Datenmenge und -qualität signifikant.

In Kombination mit dem zu kurzen Versuchszeitraum konnte unter diesen Bedingungen kein repräsentativer Datensatz gesammelt werden und eine weitere Datenaufbereitung war nicht möglich.

Für zukünftige Versuchsreihen kann der Verlust der RFID-Tags vermieden werden, indem die Antenne an der Station und nicht am Vertikallager befestigt wird. Des Weiteren können die RFID-Tags auf dem Portalkran befestigt werden. Dadurch kann der Ein- und Ausgang der Doppelwände in die Station erfasst werden, ohne dass die RFID-Tags temporär angebracht und wieder entfernt werden müssen. Es ist zu beachten, dass dafür eine Antenne mit größerer Reichweite erforderlich ist. Diese permanente Anbringung der RFID-Tags erhöht die Robustheit des Versuchs deutlich, da keine zusätzlichen Eingriffe während des Betriebs notwendig sind. Das Problem der limitierten Speicherkapazität kann durch den Einsatz von aktiven RFID-Tags gelöst werden, die mehr Informationen übertragen.

Insgesamt ermöglichen die aufgezeigten Herausforderungen und Potenziale Erkenntnisse für zukünftige Lösungsansätze bei der Implementierung von TaT-Systemen. Mit Hilfe der Simulation wird im Folgenden aufgezeigt, welche Auswirkungen ein erhöhter Durchsatz bei der Installation der Doppelwände auf das Produktionssystem bewirkt. Die so festlegbare optimale Bearbeitungszeit kann in zukünftigen Arbeiten mit einem verbesserten TaT-System überprüft werden.

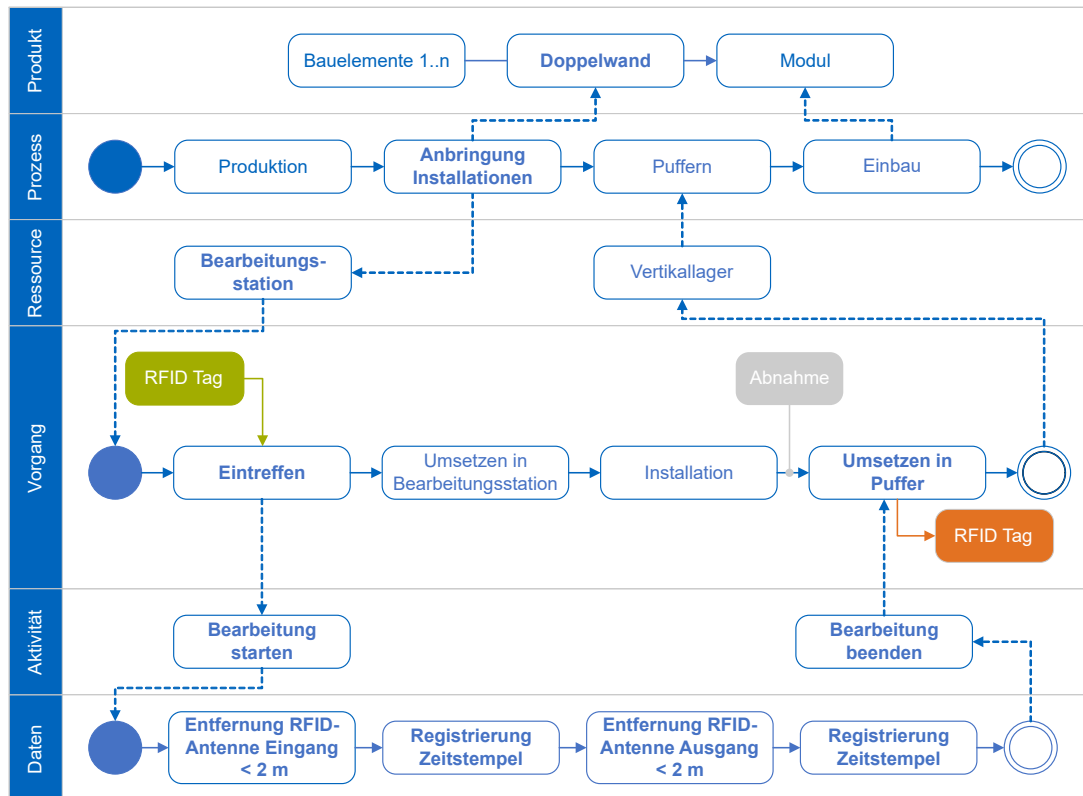


Abbildung 5-18: BPPR-Modell für die Messung der Bearbeitungszeit der Doppelwand für die Montage mit Hilfe von RFID (grün: Versorgung; orange: Entsorgung; grau: Qualitätskontrolle; eigene Darstellung)

5.5 Experimente

5.5.1 Übersicht

Abbildung 5-19 zeigt das methodische Vorgehen für den letzten Baustein der Datennutzung zur Durchführung der Experimente.

Die Experimente in der Simulationsstudie greifen die Kaizen-Blitze in Abbildung 5-5 auf. Ziel ist, die Verschwendung im Produktionssystem zu reduzieren und gleichzeitig die Auslastung und den Durchsatz zu erhöhen.

Eine Erhöhung der Auslastung ist in der Betonierstation möglich. Sie wird aktuell nur im Ein-Schichtbetrieb und mit halber Auslastung betrieben. Eine Vollausslastung der Betonierstation ist im laufenden Betrieb schwer möglich zu testen. Weiterhin ist unklar, inwiefern die Anzahl der Schmetterlinge in der Rohbaulinie in ihrem Bestand reduziert werden können bei Aufrechterhaltung des Durchsatzes.

Auf Basis der durchgeführten Experimente in Abschnitt 5.4 mit dem TaT-System ist zu untersuchen, inwiefern sich unterschiedliche Bearbeitungszeiten auf das Produktionssystem

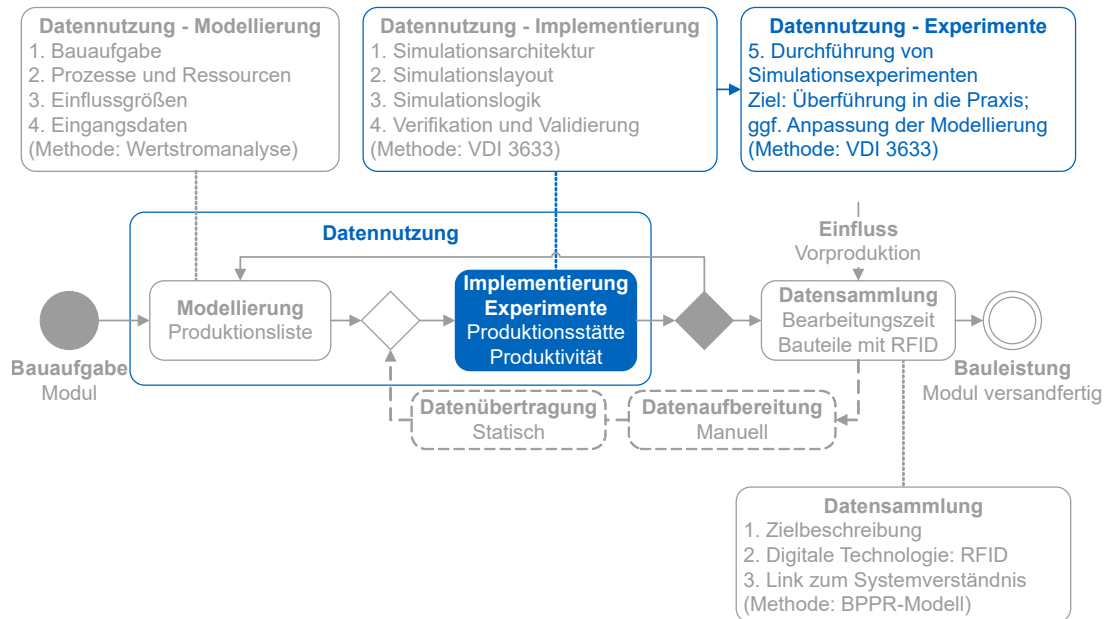


Abbildung 5-19: Baustein für die Durchführung der Experimente am Digitalen Zwilling im Modulbau (blau; eigene Darstellung)

auswirken. So kann zusätzlich mit Hilfe der Simulation eine Zielgröße für die Installation der Doppelwände festgelegt werden, deren Einhaltung später mit einem TaT-System überprüft werden kann.

Somit werden am Referenzmodell aus Abschnitt 5.3 die folgenden drei Experimente durchgeführt:

1. Erhöhung der Auslastung der Betonierstation (Kapazität und Schichtbetrieb);
2. Bestandsanalyse der Schmetterlinge in der Rohbaulinie;
3. Einfluss der Bearbeitungszeit der Doppelwand auf den Durchsatz.

In Anlehnung an die aufgezeigte relevante Literatur im Modulbau (siehe Abschnitt 3.2.3) greift Experiment 1 den aktuellen Stand der Forschung auf. Experiment 2 geht darüber hinaus und optimiert nicht die Ressourcen der Produktion, sondern deren Logistik mit den Transportbehältern. Im letzten Experiment 3 wird der ursprünglich angedachte Ansatz der Datensammlung mit Hilfe von RFID simulativ untersucht.

5.5.2 Experiment 1: Auslastung der Betonierstation

Die Simulation wird genutzt, um eine volle Auslastung der Betonierstation vorab zu testen. Zum einen wird der Schichtbetrieb an die restliche Rohbaulinie angeglichen, was bedeutet, dass von einem Ein- auf einen Zwei-Schicht-Betrieb umgestellt wird. Zum anderen wird die Kapazität von zwei Fächern (Losgröße 10) auf vier (Losgröße 20) verdoppelt. Diese volle Ausnutzung der Betonierstation wird mit dem Referenzmodell hinsichtlich der durchschnittlichen Durchlauf- und Wartezeiten sowie dem Moduldurchsatz verglichen.

Die Durchlaufzeit wird durch die Umstellung auf einen Zwei-Schicht-Betrieb von 6,4 Tagen (Referenzmodell) auf 4,5 Tage um 29,7 % reduziert (siehe Abbildung 5-20). Die durchschnittliche Wartezeit, bestehend aus dem Puffer in der Betonierstation und dem Zwischenlager, in der Montagelinie beträgt unverändert 2,6 Tage. Das Verhältnis von Warte- zu Durchlaufzeit in der Montagelinie erhöht sich damit von 40,6 % (Referenzmodell) auf 57,8 %, um 17,2 %.

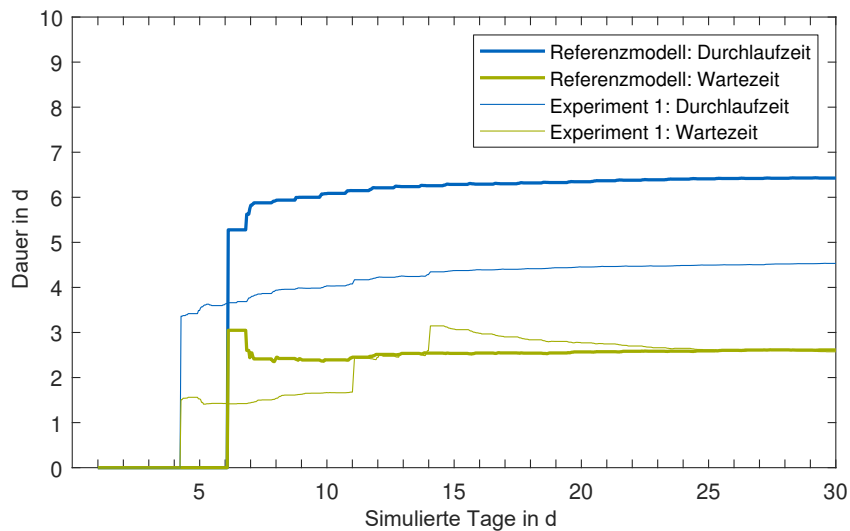


Abbildung 5-20: Durchschnittliche Durchlauf- und Wartezeiten in der Montagelinie (eigene Darstellung nach [fml-2021g])

Die Verdopplung der Kapazität der Betonierstation hat auch einen deutlichen Einfluss auf den Durchsatz der Module. Der Durchsatz erhöht sich von 5,2 Modulen pro Tag auf 8,4 Module pro Tag, was einer Steigerung von 61,5 % entspricht (siehe Abbildung 5-21).

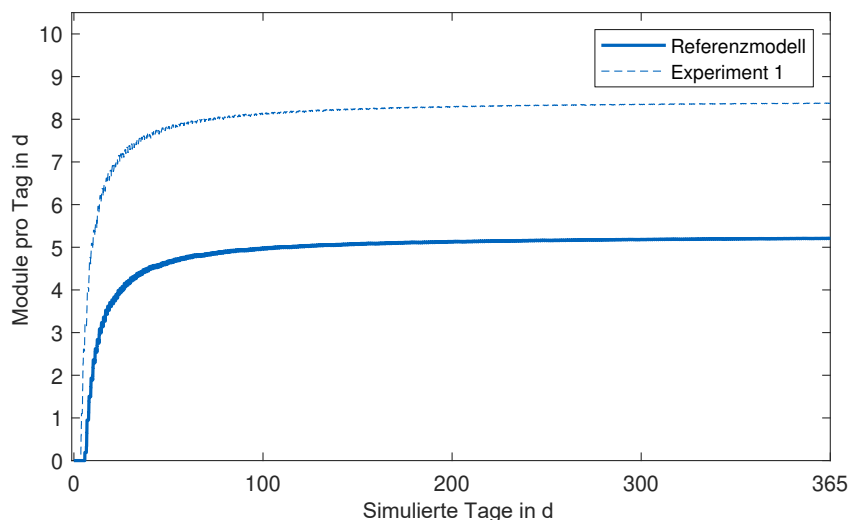


Abbildung 5-21: Durchsatz der Module pro Tag (eigene Darstellung nach [fml-2021g])

Insgesamt zeigt sich, dass die Auslastung der Betonierstation zu einer Leistungssteigerung des Produktionssystems führt. Allerdings ist diese Steigerung (61,5 %) nicht proportional

zum Verhältnis mit dem dafür benötigten Personaleinsatz für einen Zwei- statt Ein-Schicht-Betrieb (100 %). Diese Erkenntnis lässt darauf schließen, dass die zusätzliche Kapazität nicht vollständig genutzt werden kann und weitere Einflussfaktoren die Effizienz limitieren wie z. B. die Pufferkapazität in der Rohbaulinie und im Zwischenlager.

5.5.3 Experiment 2: Anzahl an Ressourcen in der Rohbaulinie

Im zweiten Experiment wird die Leistung der Produktionsanlage in Abhängigkeit der eingesetzten Schmetterlinge untersucht. Hintergrund ist das Bestreben der Lean-Bewegung, den Bestand und damit die Verschwendung zu reduzieren [Ohn-1988]. Die Verringerung unnötiger Bestände macht den Produktionsprozess schlanker und verringert die Vorlauf- und Wartezeiten in der Produktion, sodass schneller auf Änderungen reagiert werden kann.

Die folgenden Untersuchungen konzentrieren sich ausschließlich auf die Produktionsleistung. Wirtschaftliche Überlegungen, z. B. Löhne, Einnahmen oder Energiekosten, werden nicht berücksichtigt.

Es wird die Anzahl der verfügbaren und einsetzbaren Schmetterlinge von 31 (Referenzmodell) bis 20 variiert. Zur Beurteilung werden die durchschnittliche Durchlauf- (grüne Linie) und die Wartezeit (blaue Linie) betrachtet (siehe primäre vertikale Achse in Abbildung 5-22). Außerdem wird die Wartezeit beim Ausschalen in der Rohbaulinie (Station 1; graue Linie) gemessen (siehe sekundäre vertikale Achse in Abbildung 5-22).

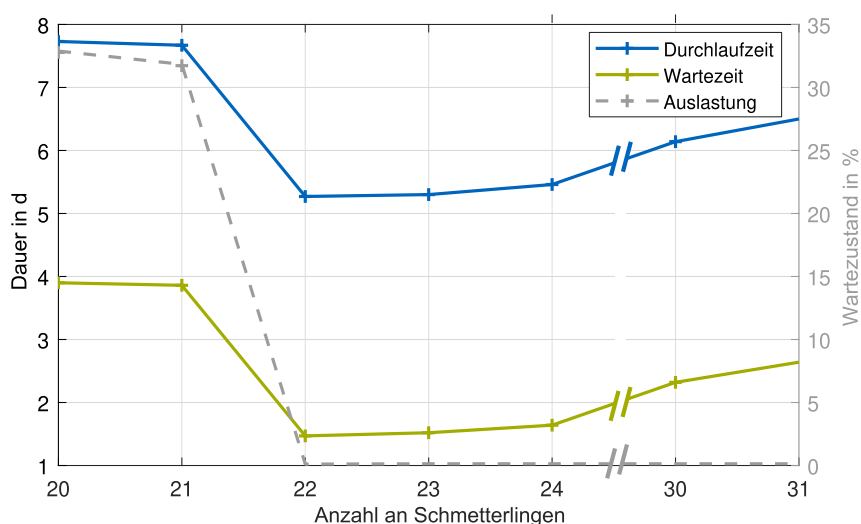


Abbildung 5-22: Abhängigkeit der Anzahl der eingesetzten Schmetterlinge auf die durchschnittliche Durchlauf- und Wartezeit in der Rohbaulinie in Tagen (primäre vertikale Achse) und auf den prozentualen Anteil der Wartezeit bei der Ausschaltung (sekundäre vertikale Achse) (eigene Darstellung nach [fml-2021g])

Es zeigt sich, dass sich eine geringere Anzahl an Schmetterlingen positiv auf die Produktionsleistung auswirkt. Werden die Schmetterlinge schrittweise reduziert, reduziert sich auch die Durchlaufzeit. Entsprechend nimmt auch die Wartezeit parallel ab. Die Kurven flachen ab

und erreichen bei einer Anzahl von 22 Schmetterlingen ihren Tiefpunkt. Eine Verringerung des Lagerbestands um 29 % von ursprünglich 31 Schmetterlingen auf 22 Schmetterlinge, führt zu einer Verringerung der Durchlaufzeit um 18,5 % von 6,5 Tage auf 5,3 Tage bzw. zu einer Verringerung der Wartezeit um 42,3 % von 2,6 Tage auf 1,5 Tage.

Eine weitere Verringerung der Anzahl an Schmetterlingen unter 22 führt wiederum zu einem starken Anstieg der Durchlauf- und Wartezeit. Es liegen zu wenige Schmetterlinge vor, so dass es zu Wartezeiten von über 30 % auf der Rohbaulinie kommt (graue gestrichelte Linie). Der Gesamtproduktionsfluss wird gestört, was zu einer Umkehr des positiven Effekts aus einem reduzierten Bestand führt.

Die Reduzierung der Schmetterlinge hat auch einen positiven Einfluss auf den Bestand im Puffer vor und nach der Betonierstation (siehe Abbildung 5-23).

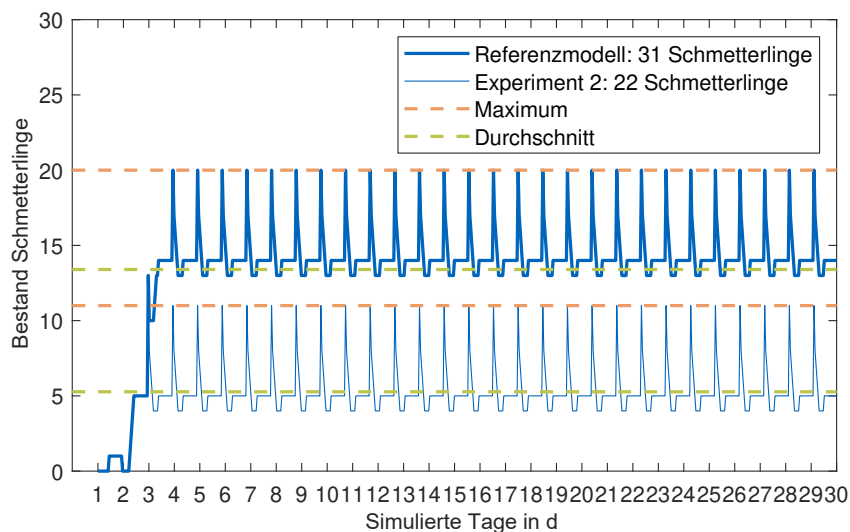


Abbildung 5-23: Vergleich des Bestands an Schmetterlingen im Puffer der Rohbaulinie (eigene Darstellung nach [fml-2021g])

Nachdem sich die Simulation eingependelt hat, zeigt sich, dass bei 22 Schmetterlingen der Bestand von im Durchschnitt 14 auf 5 Schmetterlinge um 64 % reduziert wird (gestrichelte grüne Linie). Die maximalen Bestände reduzieren sich von 20 auf 11 Schmetterlinge (–45 %) (gestrichelte orangene Linie).

5.5.4 Experiment 3: Bearbeitungszeit der Doppelwand

Im dritten Experiment wird der Einfluss der Doppelwand untersucht. Dazu werden drei Bearbeitungszeiten für die Installationen an der Doppelwand variiert und die Auslastung der einzelnen Stationen untersucht: 2 h (Referenzmodell), 3 h und 4 h. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5-24 zu sehen.

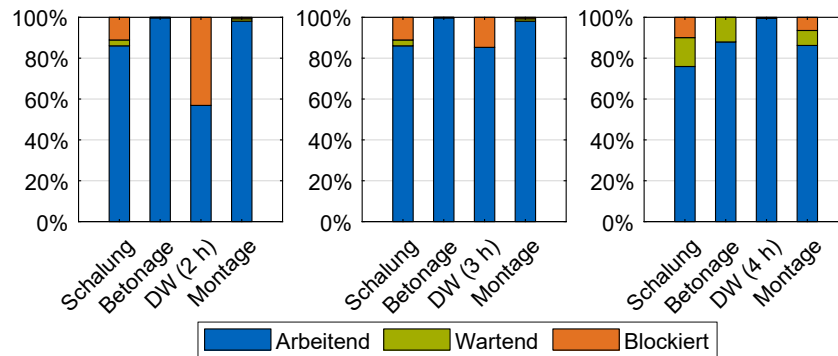


Abbildung 5-24: Auslastungsdiagramme für die Schalungslinie (Schalung), die Betonierstation (Betonage), die Doppelwand (DW)-Station und die Montagelinie (Montage) bei einer Bearbeitungszeit für die Doppelwand von 2 h (Referenzmodell), 3 h und 4 h (eigene Darstellung nach [fml-2021g])

Die Ergebnisse bestätigen, dass längere Bearbeitungszeiten für die Installationen an der Doppelwand die Montagelinie negativ beeinflussen. Während die Erhöhung der Bearbeitungszeit von 2 h auf 3 h keine Änderungen verursachen, führt eine Bearbeitungszeit von 4 h zu einer Zunahme der Wartezeiten der vor- und nachgelagerten Betonier- (12 %) und Montagestationen (6 %). Längere Bearbeitungszeiten für die Installationen an der Doppelwand wirken sich demnach negativ auf die gesamte Produktion aus.

5.6 Diskussion

Die Ergebnisse der Simulation bestätigen die Beobachtungen der Projektleitung und auch die erstellte Wertstromanalyse. Die Simulation liefert zusätzlich quantifizierbare Werte und hilft bei der Einordnung der Auswirkungen. Zielgrößen, wie die Erhöhung der Bearbeitungszeit von 2 h auf 3 h, können auf Basis der Simulationsergebnisse begründet werden.

Einflüsse von logistischen Kenngrößen, wie dem Bestand und Vorhaltung von Schmetterlingen als THMs, zeigen weitere positive Einflüsse auf die Produktion auf. Die Simulation ermöglicht diese Untersuchungen, ohne in den laufenden Betrieb einzugreifen, was zu Störungen im Betrieb führen hätte können oder die Einwilligung der beteiligten Personen erfordert.

Die Integration der Daten in die Simulation als Digitaler Zwilling kann aufgrund der aufgeführten Herausforderungen bei der Versuchsdurchführung nicht realisiert werden. Die RFID-Daten hätten die tatsächlichen Bearbeitungszeiten für die Installationen an der Doppelwand geliefert. Die Integration tatsächlicher Daten hätte das reale Produktionssystem abgebildet und damit auch die Bewertung und Ableitung von Entscheidungen unterstützt. Die Variabilität der Bearbeitungszeit hätte realitätsnah abgebildet werden können, z. B. um die Produktionslinien zu überwachen, um Engpässe rechtzeitig zu erkennen und Verzögerungen in der Montagelinie zu vermeiden [Als-2020; Alt-2015].

Neuere Forschungsarbeiten gehen dazu über, statt RFID bildbasierte Datensammlung zu untersuchen (siehe Abschnitt 3.2.3). Bildbasierte Datensammlung mit stationären Kamerasystemen haben den Vorteil, dass nicht in den Produktionsfluss eingegriffen werden muss.

Insgesamt zeigt das vorgestellte Anwendungsbeispiel aus dem Modulbau, wie das Vorgehensmodell ein Systemverständnis für die Einführung von Simulation schafft. Erste Ansätze zur Ausweitung zu einem Digitalen Zwilling werden mit der Datensammlung mit Hilfe eines TaT-Systems aufgezeigt. Dafür werden die stationären Bedingungen bewusst ausgenutzt, um die Variabilität zu reduzieren, was gleichzeitig zu einem erhöhten Standardisierungsgrad führt. Übertragen auf die nachfolgenden Anwendungsbeispiele aus der instationären Bauindustrie ist es von Vorteil, die Baustelle als Produktionssystem zu betrachten, um die Anwendung der Simulation zu erleichtern.

6 Anwendungsbeispiel 2: Innenausbau im Hochbau

6.1 Einleitung

Ziel des Anwendungsbeispiels im Hochbau ist die Abbildung und Optimierung der Materialflüsse auf der Baustelle mit alternativen Anlieferstrategien zur Versorgung der Produktion in den Taktbereichen.

Das Anwendungsbeispiel zur Entwicklung eines modularen Simulationsmodells basiert auf der von der Autorin betreuten Masterarbeit von Gschwendtner [fml-2021] und wurde gemeinsam in [Gsc-2021] veröffentlicht. Maßgeblich unterstützt wurde die Autorin von Prof. Iris D. Tommelein vom Project Production Systems Laboratory der Universität in Berkeley, Kalifornien. Die Integration von Daten von der Baustelle in die Simulation wurden im Rahmen der Studienarbeit von Grimm [fml-2023b] untersucht.

Für das Anwendungsbeispiel standen zwei Hochbauprojekte zur Verfügung. Beide Projekte wurden von einem Bauunternehmen bereitgestellt, das die Logistik innerhalb der Projekte verantwortete. Alle Arbeiten entstanden in enger Absprache mit den Expert*innen im operativen und strategischen Logistikbereich.

Für die Umsetzung des Anwendungsbeispiels wurde entsprechend dem Vorgehensmodell aus Abschnitt 4.2 vorgegangen (siehe Abbildung 6-1).

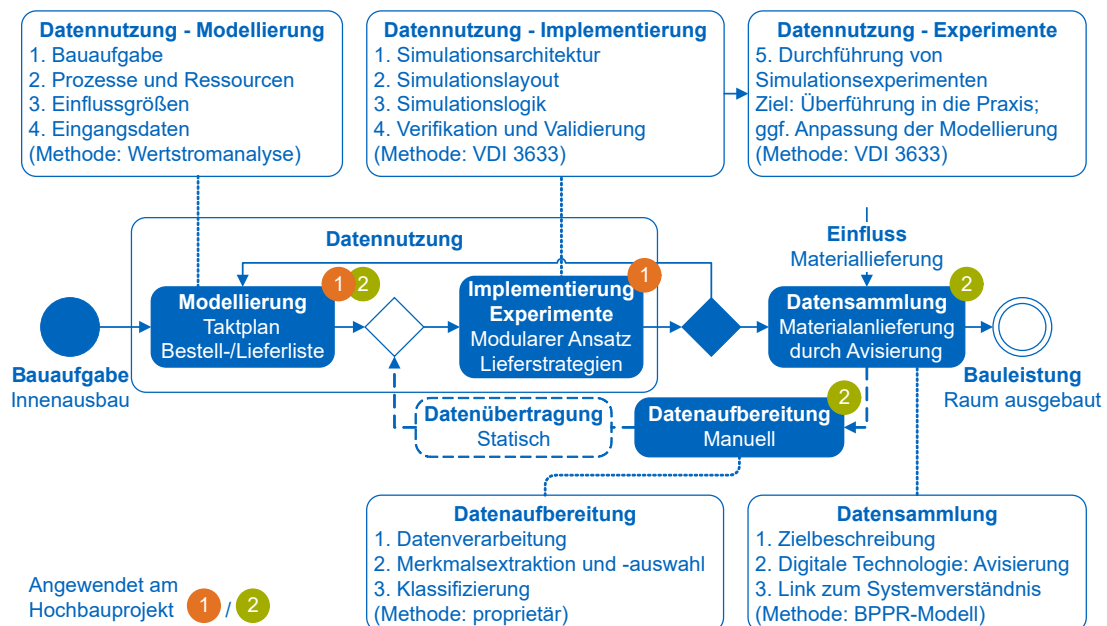


Abbildung 6-1: Bausteine für den Digitalen Zwilling im Hochbau (blau: umgesetzt; weiß: konzeptioniert; eigene Darstellung)

Die Bauaufgabe stellt den Innenausbau im Hochbau dar. Die Bauleistung entspricht der Fertigstellung von repetitiven Räumen für die Hotel- und Büronutzung mit Hilfe eines Gerüsts. Die Modellierung fokussiert sich dabei nicht auf die Produktion, sondern auf die Ver- und Entsorgung von Materialien für die einzelnen Gewerke in den Taktbereichen. Grundlage bildet der Taktplan aus dem sich die Bestell- und die Lieferlisten der Materialien pro Gewerk ableiten. Diese Ausgangssituation ist für beide Hochbauprojekte 1 und 2 gleich. Die Umsetzung und Bewertung der Bausteine erfolgt schließlich getrennt an den beiden Hochbauprojekten 1 und 2 (orangefarbene und grüne Markierung in Abbildung 6-1). Das Hochbauprojekt 1 dient dem Baustein der Datennutzung, das Hochbauprojekt 2 den Bausteinen der Datensammlung und -aufbereitung.

Für den Baustein der Datennutzung wird anhand des Hochbauprojekts 1 ein modularer Simulationsansatz zur Erfassung von Personal- und Materialflüssen auf der Baustelle modelliert und implementiert. Basierend auf den relevanten Vorarbeiten in der Forschung (siehe Abschnitt 3.2.3), insbesondere von Voigtmann [Voi-2014], wird die Entsorgung ergänzt.

Die Bausteine der Datensammlung und -aufbereitung werden anhand des Hochbauprojekts 2 umgesetzt und bewertet, da auf den Einsatz einer Avisierungssoftware während der Ausführungsphase zurückgegriffen werden kann. Die so gesammelten Ist-Daten werden manuell aufbereitet. Dadurch kann ein Defizit zur geplanten JIT-Anlieferstrategie quantifiziert werden.

Im Vergleich zum Hochbauprojekt 1 ist das Hochbauprojekt 2 signifikant umfangreicher, wodurch eine Generalisierbarkeit der Simulation aus dem Baustein der Datennutzung nicht umgesetzt wird. Um dennoch den Mehrwert der Ist-Daten für die Simulation zu verdeutlichen, wird eine alternative Anlieferstrategie mit Hilfe eines Simulationsexperiments am Hochbauprojekt 1 aufgezeigt. Somit kann zum einen der Mehrwert der Simulation in der Planungsphase für das Hochbauprojekt 1, aber auch in der Ausführungsphase unter Einbindung von Ist-Daten für das Hochbauprojekt 2 aufgezeigt werden.

Einordnung: Anwendungsbeispiel 2

Das Anwendungsbeispiel stellt die **zweite Evolutionsstufe** für einen Digitalen Zwilling dar. Im Vergleich zum Anwendungsbeispiel 1 werden neben dem Baustein für die Datennutzung, auch die Umsetzung und Bewertung der Bausteine zur Datensammlung und -aufbereitung gezeigt. Die Validierung erfolgt anhand von zwei getrennten Hochbauprojekten, um die Herausforderungen der Generalisierbarkeit aufzuzeigen.

6.2 Modellierung

6.2.1 Überblick

Abbildung 6-2 zeigt das methodische Vorgehen für den Baustein der Datennutzung zur Modellierung der Simulation. Die Modellierung selbst erfolgt am Hochbauprojekt 1. Allerdings nimmt die folgende Beschreibung der Bauaufgabe, der Prozesse und Ressourcen, der Einflussgrößen und der Eingangsdaten auch Bezug auf das Hochbauprojekt 2, um die Generalisierbarkeit zu gewährleisten.

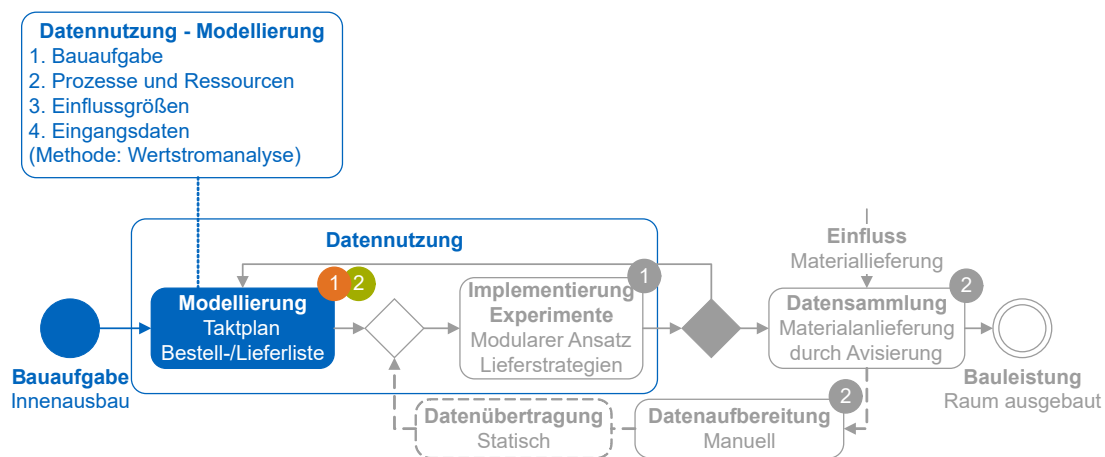


Abbildung 6-2: Baustein für die Modellierung des Digitalen Zwillings am Hochbauprojekt 1 und 2 (blau; eigene Darstellung)

6.2.2 Bauaufgabe

Bei der Bauaufgabe handelt es sich bei beiden Hochbauprojekten 1 und 2 um eine Hotel- und Büronutzung. Kennzeichnend für diese Gebäudetypen sind mehrere Geschosse mit sich wiederholenden Grundrissen, sogenannten Regelgeschossen. Diese Regelgeschosse können sowohl im Erdgeschoss (EG), sowie Untergeschoss (UG) bis Obergeschoss (OG) vorkommen. Jedes Regelgeschoss ist in mehrere Taktbereiche eingeteilt, die aus mehreren Räumen und einem verbindenden Flur bestehen.

6.2.3 Prozesse und Ressourcen

Zur Aufnahme des Prozesses werden Interviews mit dem Industriepartner geführt. Eine Begehung der Baustelle fand nur für das Hochbauprojekt 2 statt, da das Hochbauprojekt 1 zum Zeitpunkt der Arbeit bereits abgeschlossen war. Die Prozesse und Ressourcen können vereinfacht aus der Wertstromanalyse in Abbildung 6-3 entnommen werden.

Bei den baubetrieblichen Prozessen handelt es sich um Tätigkeiten von Gewerken des Innenausbaus, z. B. Bodenverlegearbeiten. Es wird angenommen, dass der Terminplan und

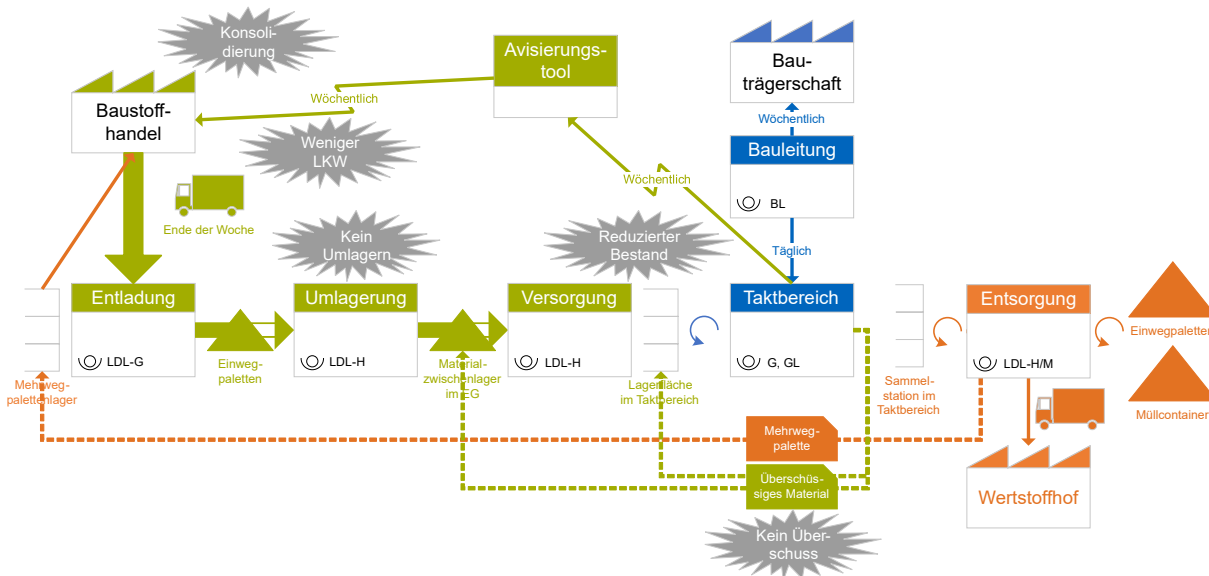


Abbildung 6-3: Wertstromanalyse für die Ver- und Entsorgung der Hochbauprojekte 1 und 2 (blau: Produktion; grün: Versorgung; orange: Entsorgung; Abkürzung zu BL: Bauleitung, G(L): Gewerk(sleitung), LDL-G/H/M: LDL mit Gabelstapler, Hubwagen, Mülltonne; eigene Darstellung)

damit der Taktplan von den Gewerken eingehalten wird, d. h. es wird ein störungsfreier Baubetrieb angenommen. Auf dieser Grundlage kann der Materialbedarf pro Aufgabe abgeleitet werden. In Kombination mit dem Taktplan ergibt sich der Materialbedarf pro Woche. Dieser Materialbedarf pro Woche wird für das gesamte Projekt und für alle Taktbereiche getrennt benötigt. Auf der Grundlage dieser Berechnungen können die bauleistungslogistischen Prozesse geplant werden. Die Vorgänge der Ver- und Entsorgung der Taktbereiche sind voneinander entkoppelt und werden von LDL-Personal durchgeführt.

Insgesamt werden vier Prozesse modelliert:

1. Entladung der LKWs in der Entladezone (Schnittstelle zur Versorgungslogistik);
2. Versorgung der Taktbereiche mit dem benötigten Material (Produktionslogistik);
3. Handhabung von überschüssigem Material in den Taktbereichen (Produktionslogistik);
4. Entsorgung von Abfällen inkl. Leerpalletten (Schnittstelle zur Entsorgungslogistik).

Nach dem Taktplan werden die Materialbestellungen pro Woche und pro Gewerk zusammengefasst. Die benötigten Materialien werden nach dem JIT-Prinzip auf den vorgesehenen LHMs in der Vorwoche für jedes Gewerk einzeln auf die Baustelle geliefert (siehe graue Box links in Abbildung 6-4). Die LHMs werden einzeln von einer LDL-Person vom LKW abgeladen und im Materiallager (grüne Box) im EG zwischengelagert. Falls Leerpalletten im Leerpallettenlager (orangene Box links) vorhanden sind, werden diese nach dem Entladen des LKWs von der LDL-Person auf den selben LKW geladen. Das LDL-Personal liefert das Material aus dem Materiallager an jeden Taktbereich (blaue Boxen) entsprechend dem Bedarf für jede Arbeitsgruppe in der nächsten Woche.

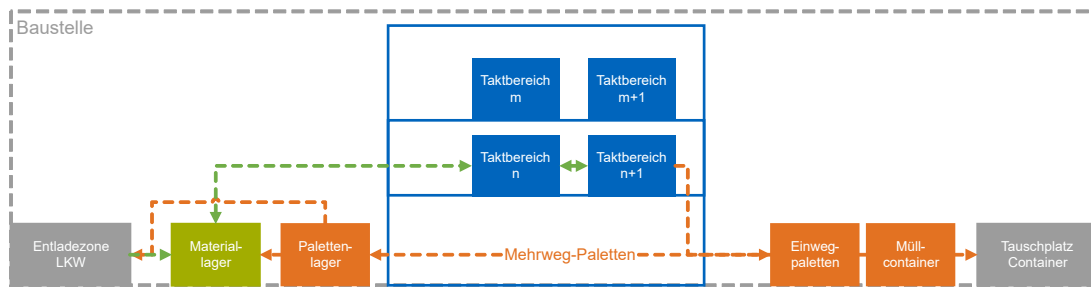


Abbildung 6-4: Seitenansicht für die schematische Darstellung des Materialflusses für die Hochbauprojekte 1 und 2 (grün: Versorgung; orange: Entsorgung; eigene Darstellung nach [Boe-2006; fml-2021; Voi-2014])

Für die vertikale Versorgung in die Stockwerke sind Aufzüge an der Außenseite des Gebäudes und innerhalb des Gebäudes vorhanden (siehe blaue Flächen in Abbildung 6-5). Im Hochbauprojekt 1 liegt hier eine Besonderheit vor, da eine Aufgabentrennung der Aufzüge vorliegt. Der Außenaufzug ist ein Lastenaufzug, der von den Gewerke-Personen und für die Materialversorgung genutzt wird. Der Innenaufzug wird nur zur Entsorgung der Paletten und der Mülltonnen genutzt.

Sobald der Transport mit einem Aufzug beendet ist, bleibt der Aufzug an seiner Position stehen, bis der nächste Transport angefordert wird. Während eines Transports gibt es keine Zwischenstopps zwischen dem Herkunfts- und dem Ziel-Geschoss. Die Gewerke-Personen nutzen die Aufzüge auch, um morgens, in den Pausen und am Ende ihres Arbeitstags zu ihrem Arbeitsplatz in den Taktbereichen zu gelangen. Auf Grundlage von regelmäßigen Gesprächen mit dem Industriepartner, werden Annahmen für das Verhalten in den Pausen getroffen. Für die Pausen wird angenommen, dass 90 % der Gewerke-Personen ihre Pausen im EG verbringen. Die restlichen 10 % verbleiben auf den Geschossen.

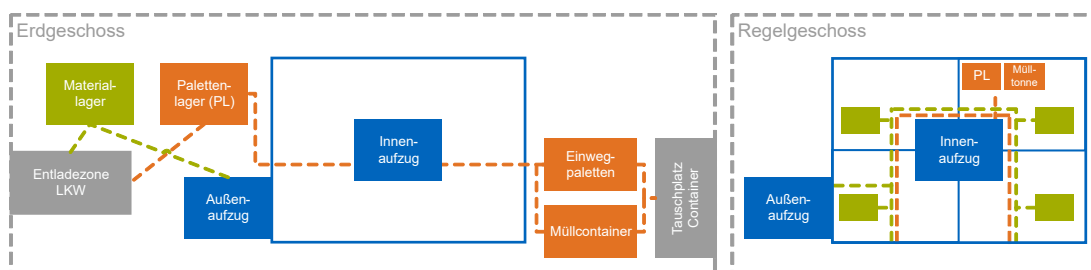


Abbildung 6-5: Draufsicht für die schematische Darstellung des Materialflusses im Erd- und Regelgeschoss für die Hochbauprojekte 1 und 2 (grün: Versorgung; orange: Entsorgung; eigene Darstellung nach [Boe-2006; fml-2021; Voi-2014])

Die horizontale Versorgung erfolgt mit Hilfe von THMs, wie Radladern, Teleskopladern oder Gabelstaplern (im EG) und Hubwagen (pro OG). Die THMs werden, gemäß der Lean Methode 5S zur Ordnung und Sauberkeit [VDI-2553], an den Aufzügen vor und nach Erledigung einer Aufgabe abgestellt.

Durch die Anlieferung in standardisierten LHMs, wie Paletten oder Bündel, entspricht die gelieferte Materialmenge nicht den tatsächlich benötigten Materialmengen in den dafür vorgesehenen Taktbereichen. Daher findet nach der Entladung eine Trennung im Materiallager im EG statt. Die benötigte Anzahl von Materialien wird auf eine Leerpallette umgeladen (siehe orangene Flächen im EG in Abbildung 6-5) und in den Taktbereich transportiert. Im Materiallager (grüne Flächen im Regelgeschoss) sammeln sich so teilbefüllte LHMs. Sperrige Materialien, wie z. B. Gipskartonplatten, werden nicht im Materiallager getrennt. Überschüssiges Material wird von Taktbereich zu Taktbereich umgeschlagen (grüne Flächen rechts). Sobald ein Gewerk seinen Vorgang beendet hat, meldet die Arbeitsgruppe, ob noch überschüssiges Material im Taktbereich vorhanden ist. Eine LDL-Person prüft, wo das Material in der folgenden Woche benötigt wird und bestimmt den nächsten Bestimmungsort für das überschüssige Material gemäß den folgenden Prioritätsregeln:

1. Gleicher Taktbereich,
2. Nachfolgender Taktbereich im selben Geschoss,
3. Beliebiger Taktbereich im selben Geschoss,
4. Beliebiger Taktbereich in einem nachfolgenden Geschoss,
5. Beliebiger Taktbereich und
6. Materiallager im EG.

Ist bereits ein teilgefülltes LHM desselben Materials eingelagert (orangene Fläche im Regelgeschoss), erfolgt eine Umlagerung, bis das neu angelieferte LHM leer ist oder die maximale Kapazität des eingelagerten LHMs erreicht ist. Paletten, die bei dieser Umlagerung leer werden, werden gestapelt und im Regelgeschoss gesammelt (orangene Fläche im Regelgeschoss).

Anfallender Abfall wird täglich von einer LDL-Person pro Geschoss eingesammelt. Auf jedem Geschoss gibt es eine Mülltonne auf Rollen für jede gewünschte Abfallfraktion (siehe orangene Fläche im Regelgeschoss in Abbildung 6-5). Im EG gibt es einen Wertstoffhof mit einem Müllcontainer pro Abfallfraktion und einem Zwischenlager für Mehrwegpaletten. Ist eine Mülltonne im Regelgeschoss voll, wird der Behälter von einer LDL-Person eingesammelt und über die Aufzüge in den entsprechenden Container im EG gebracht. Anschließend wird der Sammelvorgang bei der Rückkehr in das EG fortgesetzt. Für jeden dieser EHMs (Mülltonne oder -container) gibt es einen festgelegten maximalen Füllstand, der sich aus dem Auflockerungsfaktor und einem Faktor zur Gewichtung der erschwerten Handhabung von herausfallendem Abfall zusammensetzt, z. B. 90 % der Kapazität des EHMs.

Der Umgang mit Leerpaletten erfolgt ähnlich wie bei der Abfallentsorgung. Die leeren Paletten werden auf jedem Geschoss täglich zentral von einer LDL-Person eingesammelt und zwischengelagert (siehe orangene Fläche im Regelgeschoss in Abbildung 6-5). Bei Erreichen einer vorher festgelegten Anzahl von Leerpaletten (hier fünf) pro Geschoss transportiert die LDL-Person diese ins EG. Erst bei Erreichen des Wertstoffhofs wird unterschieden zwischen

Einweg- und Mehrwegpalette (orangene Flächen rechts im EG). Die leeren Einwegpaletten werden in den Müllcontainer für Holzabfälle entsorgt. Die leeren Mehrwegpaletten werden neben dem Materiallager getrennt zwischengelagert. Sie werden von den ankommenden LKWs nach dem Abladen der Materialien wieder aufgenommen, in den dann leeren LKW geladen und vom Gelände entfernt (graue Fläche rechts im EG).

6.2.4 Einflussgrößen

Die Einflussgrößen auf das vorliegende Produktionssystem gehen aus der Wertstromanalyse hervor:

- **Art und Anzahl der horizontalen THMs:** Die Kapazität und die Geschwindigkeit der horizontalen THMs im Innen- und Außenbereich ist variabel, während die Anzahl aufgrund der Platzverhältnisse fix ist;
- **Entkopplung der vertikalen THMs:** Eine Trennung der Aufzüge nach Nutzung durch Gewerke- oder LDL-Personal oder Ver- und Entsorgung wie im Hochbauprojekt 1 führt zu einer unterschiedlichen Auslastung;
- **Anzahl an LDL-Personal:** Alle logistischen Prozesse mit oder ohne Einsatz von horizontalen THMs benötigen LDL-Personal (siehe LDL-G/H/M in Abbildung 6-3);
- **Anlieferstrategie:** Die vorgegebene JIT-Anlieferung wirkt sich auf das Lieferverkehrsaufkommen, den Bestand und die Umlagerung der Materialien nach der Entladung und der Produktion in den Taktbereichen aus;
- **Lieferverkehrsaufkommen:** Die ankommenden LKWs entsprechen dem Bedarf der Produktion, so dass die Entladung und Versorgung in das Materiallager oder direkt in die Taktbereiche priorisiert wird;
- **Abfallaufkommen:** Geringe Abfallmengen reduzieren das Lieferaufkommen für die Entsorgungslogistik;
- **Abfallzusammensetzung:** Die Sortierung des Mülls am Entstehungsort (Taktbereiche) wirkt sich auf die Anzahl der Transporte zur Entsorgungsstätte aus;
- **Zeitliche Entwicklung der Fertigstellung:** Das Materialaufkommen und damit die Ressourcenplanung richtet sich nach dem Taktplan zur Fertigstellung des Hochbauprojekts (typischerweise parabelförmig).

In dieser Arbeit wird die Einflussgröße der Anlieferstrategie exemplarisch gezeigt. Die Optimierung der Ressourcen (horizontale und vertikale THMs, LDL-Personal) wird in der von der Autorin betreuten Masterarbeit von Gschwendtner [fml-2021] vorgestellt.

6.2.5 Eingangsdaten

Tabelle 6-1 klassifiziert die Eingangsdaten für die beiden Hochbauprojekte.

Tabelle 6-1: Eingangsdaten für die Hochbauprojekte 1 und 2 (eigene Darstellung)

	Merkmale	Hochbauprojekt 1	Hochbauprojekt 2
Baustellenspezifisch (Produkt)	Geschossfläche	11.000 m ²	32.000 m ²
	Anzahl der Geschosse	1 EG, 6 OGs	1 EG, 4 bzw. 17 OGs, 3 UGs
	Anzahl der Taktbereiche	6	13 bzw. 3 und 4 UGs
	Anzahl der Gewerke	8	27
Bauaufgabenspezif. (Prozess)	Projektdauer	35 Wochen in 2020	120 Wochen in 2021–2023
	Anzahl der Tätigkeiten	865	6657
	Anzahl der Anlieferungen	291	6692
	Anzahl der gelieferten Materialien	37.908	1.239.563
	Anzahl der LHMs	4212	22.253
	Anzahl der Abfallfraktionen	5	8
	LDL-Personal	3 Personen	3 Personen
Unternehmensspezif. (Ressource)	Vertikale THMs	1 Ver-, 1 Entsorgungsaufzug (12 m/min, max. 5 Personen)	1 Aufzug (30 m/min, max. 5 Personen), 1 Rampe
	Horizontale THMs	1 Teleskopplader (für EG), elektrischer Hubwagen (je OG, 2,6 km/h)	1 Teleskopplader (für EG und UG), 1 Hubwagen (je OG, 3,6 km/h)
	LKWs	Ver-/Entsorgung aufwendig	Versorgung aufwendig, Entsorgung einfach
Bautechnologisch (Methode)	Anlieferstrategie	JIT (7 d vor Ausführung)	JIT (7 d vor Ausführung)

Die baustellenspezifischen Daten gehen aus Grundrissplänen hervor. Beide Projekte ähneln sich hinsichtlich ihrer späteren Nutzung. Hotel- bzw. Büroräume sind hochgradig repetitiv: Insbesondere die OGs verfügen über ähnliche Grundrisse. In beiden Fällen ist daher auch eine Taktplanung nach Lean Construction zur Umsetzung des Innenausbaus vorgesehen (siehe Abschnitt 2.1.3). Dazu werden die OGs in mehrere Taktbereiche unterteilt, die eine Kombination aus mehreren Räumen und dem entsprechenden Teil des Flurs darstellen. Taktbereiche erfordern in der Regel ähnliche Ressourcen in Bezug auf Materialarten und -mengen sowie die für die Ausbauarbeiten erforderlichen Fähigkeiten des Gewerk-Personals.

Für die bauaufgabenspezifischen Daten liegt der Taktplan der Gewerke vor. Aus ihm kann die Projektdauer und die Anzahl der Tätigkeiten entnommen werden. In beiden Projekten liegt ein 1-Wochen-Takt vor. Die Arbeitszeiten der Gewerke sind von 7:00 Uhr bis 16:00 Uhr mit Pausen von 9:00 Uhr bis 9:15 Uhr und 12:00 Uhr bis 12:45 Uhr. Die restlichen Daten zur Ver- und Entsorgung auf der Baustelle werden daraus händisch ermittelt, da nicht von

jedem Gewerk die benötigten Material- und Abfallmengen vorliegen. Vereinfacht wird daher angenommen, dass die Mengen in jedem Regelgeschoss gleich sind und nur auf vollen LHMs geliefert werden. Hierzu unterscheiden sich die beiden Hochbauprojekte deutlich: Sind im Hochbauprojekt 1 insgesamt sechs Geschosse zu beliefern, sind es durch die UGs, der zusätzlichen Berücksichtigung des EGs und einem Turm im Hochbauprojekt 2 insgesamt 21 Geschosse.

In beiden Hochbauprojekten werden nur die für die Tätigkeiten charakteristischen Materialien abgebildet, wie z. B. Rohre für die Installation von Sanitäranlagen. Kleinteile, die für die Montage benötigt werden, wie z. B. Schrauben oder Hilfsstoffe, wie z. B. Schutzfolien, die die Montage unterstützen, werden weitgehend vernachlässigt. Diese Vereinfachung kann insbesondere bei der Entsorgung ins Gewicht fallen, da Kleinteile und Hilfsstoffe zwar keinen Abfall durch Verschnitt produzieren, dafür jedoch einen hohen Anteil an Verpackungsmüll.

Die unternehmensspezifischen Eingangsdaten beziehen sich auf die vorhandenen Ressourcen. Ihre Aufwandswerte basieren auf der empirischen Studie von Dengler [Den-2020]. In ihrer Studienarbeit werden die verschiedenen Dauern von Transporten gemessen und kategorisiert, z. B. das Entladen von ankommenden LKWs unter optimalen (direkte Entladung möglich), normalen (Rangieren notwendig) und aufwendigen Bedingungen (Räumung der Entladezone notwendig). Im Rahmen der Studienarbeit von Gschwendtner [fml-2021] werden diese Daten für das Simulationsmodell aufgegriffen und zum Teil angepasst, z. B. wird die Dauer für das Entladen der ankommenden LKWs untergliedert (Fahrt zum LKW, Entladen einer TE, Fahrt zum Materiallager, Einlagerung des Materials in das Materiallager).

Als horizontales THM kommt ein Teleskoplader für die Entladung der LKWs und die Versorgung der UGs zum Einsatz. Zum Transport der Materialien vom Materiallager zum Aufzug und zum Weitertransport auf den Geschossen sowie zur Entsorgung der Leerpaletten zu den Taktbereichen werden pro Geschoss ein elektrischer Hubwagen (1 m/s, Hochbauprojekt 1) bzw. Handhubwagen (0,714 m/s, Hochbauprojekt 2) verwendet. Untersuchungen von Gschwendtner [fml-2021] zeigen kaum einen Einfluss der horizontalen THMs in den Geschossen. Der Transport von Materialien und Abfällen erfolgt in rollbaren Mülltonnen. In den Geschossen gibt es pro Taktbereich eine Mülltonne. Die Sammelstellen im EG bestehen aus Müllcontainern, die vom LKW unter einfachen Bedingungen aufgenommen und abtransportiert werden.

Die bautechnologischen Eingangsdaten beziehen sich auf die vorgegebene JIT-Anlieferstrategie für die Materialien im Projekt. Demnach sollen die Materialien bereits eine Woche vor dem Einbau auf die Baustelle geliefert und im Taktbereich eingelagert sein.

In Hochbauprojekt 1 und 2 birgt die innerstädtische Lage besondere logistische Herausforderungen durch verengte Lagerverhältnisse. Das Rangieren und Parken der LKWs wird als aufwendig betrachtet. Material wird mittwochs, donnerstags und freitags angeliefert, wobei erst donnerstags mit der Versorgung der Taktbereiche begonnen wird.

Insgesamt leiten sich dadurch folgende Eingangsdaten für die Simulation ab:

- **Taktplan:** Tätigkeiten eines Gewerks pro Taktbereich inkl. Anzahl zugehörigem Gewerke-Personal und Datum der Ausführung;
- **Bestellliste:** Anzahl und Art des benötigten Materials und zugehörigen LHMs pro Gewerk und Datum der Bestellung;
- **Lieferliste:** Anzahl des benötigten Materials und der zugehörigen LHMs inkl. Angaben zum Taktbereich, Geschoss und Datum für die Auslieferung in den Taktbereich;
- **Aufwandswerte:** Dauer pro Tätigkeit und Materialeinheiten;
- **Abfallaufkommen:** Anfallende Abfallfraktionen und deren LHMs;
- **Grundriss:** Entfernungen zwischen Taktbereichen und Lagern, Flurlänge, Geschosshöhe.

6.3 Implementierung

6.3.1 Überblick

Abbildung 6-6 zeigt das methodische Vorgehen für den Baustein der Datennutzung zur Implementierung der Simulation für das Hochbauprojekt 1. Es wird die implementierte Simulationsarchitektur, -layout und -logik vorgestellt. Anschließend erfolgt die Verifikation und Validierung der Simulation.

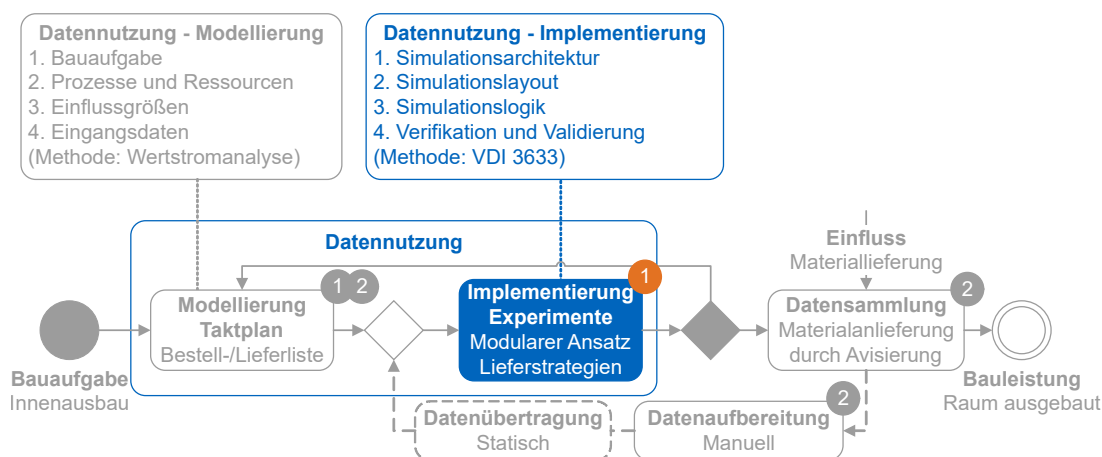


Abbildung 6-6: Baustein für die Implementierung des Digitalen Zwillings am Hochbauprojekt 1 (blau; eigene Darstellung)

Trotz des bewusst modular gewählten Simulationsansatzes wird die Generalisierbarkeit des Hochbauprojekts 1 auf das Hochbauprojekt 2 nicht vorgestellt. Grund dafür sind die Herausforderungen, die mit dem Mengenanstieg im Hochbauprojekt 2 einhergehen, auf die im nachfolgenden Baustein zur Datensammlung in Abschnitt 6.4 eingegangen wird.

6.3.2 Simulationsarchitektur

Das Modell wird mit der Simulationssoftware Plant Simulation Version 15.1.0 umgesetzt.

Als Grundlage für den modularisierten Ansatz dient die Arbeit von Voigtmann [Voi-2014]. Die Umsetzung erfolgt daher auch constraint-basiert nach Beißert [Bei-2012], zitiert nach [Voi-2014, S. 54 ff.]. Dazu werden die folgenden Bibliotheken definiert:

- **Materialien:** Art, zugehöriges LHM, TE pro LHM, Umlagerung, Abfallfraktion, -anteil, -volumen, Aufwandswert Entsorgung;
- **LHMs:** Art (Europalette, Bündel, Eimer, Kabeltrommel, Paket, Sack, Stück), Abmessungen, Lagerfläche, Kapazität, Wiederverwendbarkeit;
- **Vertikale THMs:** Art (Scheren-, Aufzug), Anzahl, Einsatzort (innen, außen), Kapazität, Geschwindigkeit, Aufwandswert (Türöffnen), Kosten pro Betriebsstunde;
- **Horizontale THMs:** Art ((elektrischer) Hubwagen, Radlader, Teleskoplader, Gabelstapler, LKW mit Hebegabel), Anzahl, Einsatzort (EG, Regelgeschoss), Geschwindigkeit, Kapazität, Aufwandswerte (Entladung LKW, Beladung vertikales THM, Auf- und Abladen), Kosten pro Betriebsstunde;
- **EHMs:** Art (Mülltonne, -container), Anzahl, Geschwindigkeit, Lagerfläche, Kapazität, Aufwandswerte;
- **LKWs:** Art (Ver-, Entsorgung), Lagerfläche, Aufwandswert (Parken, Müllcontainertausch), Auslieferungs- und Anlieferungstage;
- **Abfallfraktionen:** Art, zugehöriges EHM;
- **Personal:** Anzahl LDL-Personal (Gewerke-Personal ist durch Taktplan festgelegt), Schichtzeiten, Pausenanteil im EG (nur Gewerke-Personal);
- **Layout:** Anzahl Regelgeschosse und Taktbereiche, Geschosshöhe, Flurlänge, Position (Taktbereich, Lager, vertikale THM, EHM), Wegeart (Kreisweg).

Zu Beginn eines Simulationslaufs werden die Parameter dieser Bibliotheken über eine Bedienoberfläche abgefragt und festgelegt. Das Simulationsmodell wird automatisiert erstellt und gestartet.

Zum besseren Verständnis der Simulationsergebnisse stellt die implementierte Simulationsoberfläche die bauphysikalischen Prozesse grafisch dar. Nach jedem Simulationslauf werden die Ergebnisse automatisch exportiert. Die Visualisierung wird in einer Excel Tabelle realisiert.

Folgende Ergebnisse werden angezeigt:

- Logistikstunden und -kosten pro Ressource (THM, LDL-Personal);
- Ankommende LKWs und TGs pro KW;
- Personalaufkommen der Gewerke pro KW;
- Max. Flächenbelegung pro KW und Puffer;
- Abfallaufkommen pro KW und Geschoss;
- Ausgetauschte Müllcontainer pro KW;
- Auslastung LDL-Personal (Logistikstunden und Aufgabenverteilung) pro KW, z. B. Versorgung;
- Auslastung vertikaler und horizontaler THMs (Logistikstunden und Aufgabenverteilung) pro KW, z. B. Warten.

6.3.3 Simulationslayout

Die Basis der Simulation bildet das EG mit den logistischen Ressourcen und Prozessen. Darauf aufbauend lassen sich die folgenden Netzwerke ineinander überführen: EG, Regelgeschosse und Taktbereiche.

Die entsprechenden Simulationslayouts auf Basis des Materialflusses in den Abbildungen 6-4 und 6-5 sind in den Abbildungen 6-7, 6-8 und 6-9 dargestellt.

Die Anlieferung mit dem LKW erfolgt vereinfacht über eine staufähige Förderstrecke ohne Kapazitätsbegrenzung. Der Anfahrtsweg und das Verkehrsaufkommen werden nicht betrachtet. An der Entladezone findet die Übergabe an die Baustelle statt. Be- und Entladung des LKWs finden auf Bearbeitungsstationen statt. Die Entsorgung der Müllcontainer erfolgt entkoppelt. Die Materiallager werden als Lager modelliert.

Das Regelgeschoss enthält die Schnittstelle zu den vertikalen THMs, den Taktbereichen und Lagern (Mülleimer, Leerpalletten). Für den Materialtransport im EG dienen Wege mit Sensoren, die die Positionen der Bausteine definieren. Alle Wege im Modell sind zweispurig modelliert, d. h. Gegenverkehr wird zugelassen. Die horizontalen THMs sowie die EHMs werden als Fahrzeuge modelliert, die jeweils ein LDL-Personal zur Bedienung erfordern. Die vertikalen THMs werden vereinfacht als Weg mit Sensoren modelliert, wobei der Abstand der Sensoren der Geschosshöhe entspricht. Die Übergabe zu den vertikalen THMs erfolgt über Puffer.

Die Taktbereiche haben eine Schnittstelle für die Materialversorgung (Materialpuffer) und -entsorgung (Verschnitt- und Leerpallettenpuffer). Die zu verrichtende Tätigkeit wird vereinfacht über eine Parallelstation modelliert, um die Materialien gleichzeitig verarbeiten zu können.

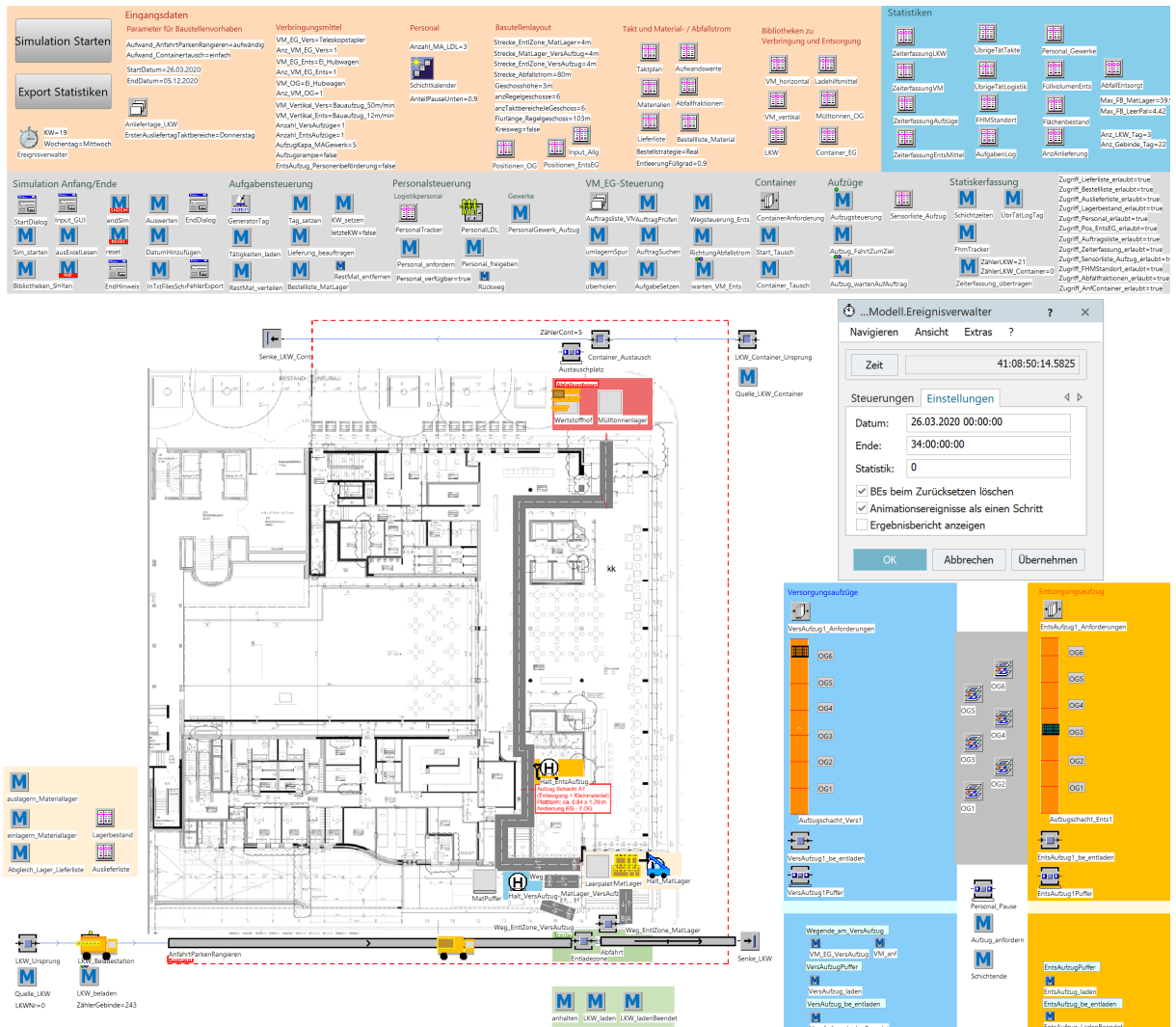


Abbildung 6-7: Ausschnitt des implementierten Simulationslayouts für das EG [fml-2021]

Folgende Parameter können über die Bedienoberfläche variiert werden, um das Simulationsmodell auf ähnliche Hochbauprojekte anzuwenden:

- Anzahl Regelgeschosse und Taktbereiche;
- Geschosshöhe;
- Flurlänge;
- Position und Anordnung (Taktbereich, Lager, vertikale THMs, EHMs).

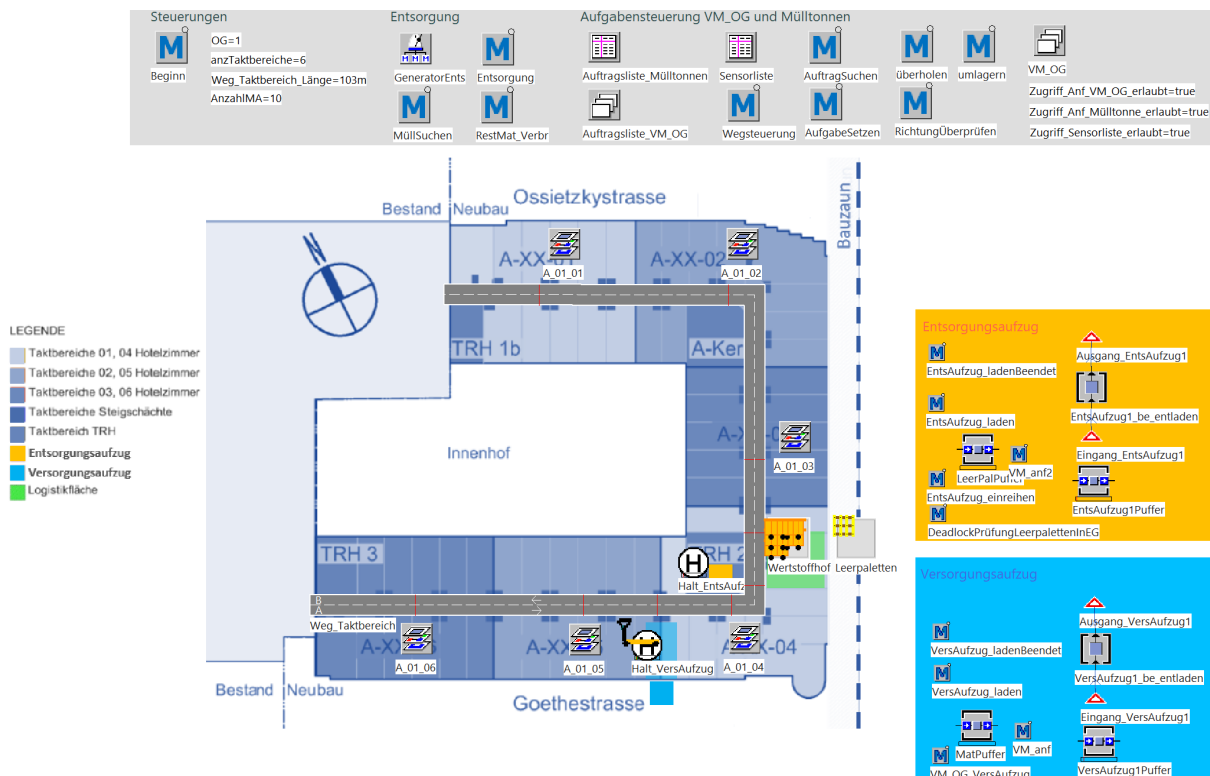


Abbildung 6-8: Ausschnitt des implementierten Simulationslayouts für ein Regelgeschoss [fml-2021]

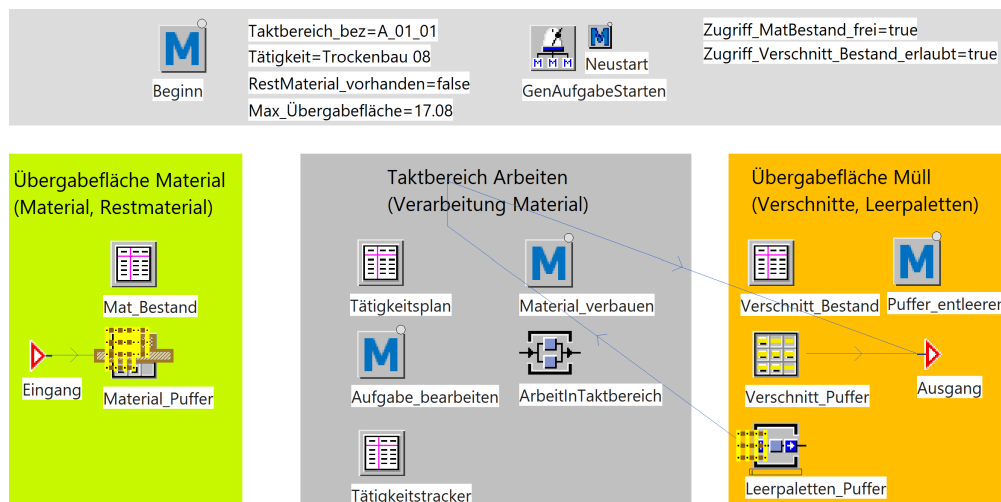


Abbildung 6-9: Ausschnitt des implementierten Simulationslayouts für einen Taktbereich in den Regelgeschossen [fml-2021]

6.3.4 Simulationslogik

Die Simulationslogik setzt sich aus Prozess- (Versorgung (grün), Entsorgung (orange)) und Ressourcenverwaltung (Geräte (grau), Personal (blau)) zusammen (siehe Abbildung 6-10).

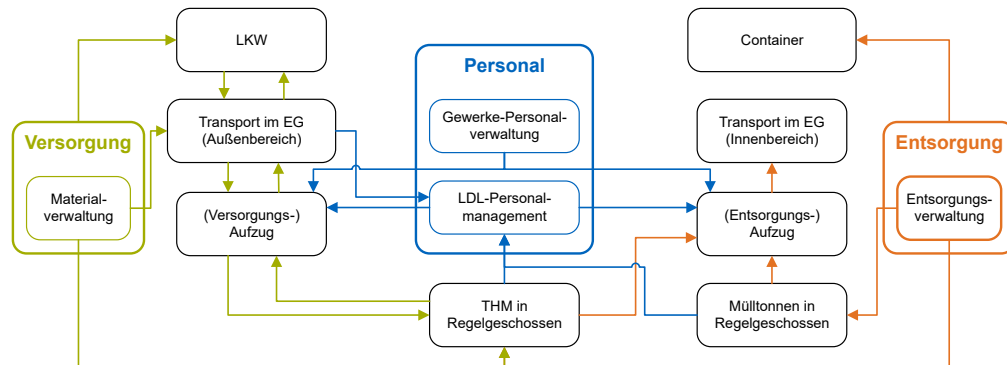


Abbildung 6-10: Simulationslogik (eigene Darstellung nach [fml-2021])

Versorgung

Die Prozessverwaltung löst jeden Arbeitstag über einen Generator aus. Anhand der Lieferliste überprüft die Materialverwaltung die fälligen Lieferaufgaben für die aktuelle KW. Dies geschieht zu Beginn eines jeden Arbeitstags (siehe Abbildung 6-11a). Die Materialverwaltung prüft zuvor, ob sich das Material aus vorherigen Überschüssen im Materiallager befindet. Trifft ein LKW auf der Entladezone ein, fordert er eines der THMs im Außenbereich an, um entladen zu werden. Bei schon vorhandenem Material im Materiallager übernimmt die Anforderung des THMs die Materialverwaltung direkt (siehe Abbildung 6-11b). Wird ein THM eine Aufgabe zugewiesen, fordert es gleichzeitig eine LDL-Person bei der Personalverwaltung an (siehe Abbildung 6-11c).

Die pro Taktbereich und Kalenderwoche geplanten Tätigkeiten werden von der zentralen Aufgabenverwaltung gemäß dem Taktplan dem Taktbereich zugeordnet (siehe Abbildung 6-12). Die zugeordneten Aufgaben werden sequentiell abgearbeitet. Um sicherzustellen, dass eine Lieferverzögerung auch eine Arbeitsverzögerung verursacht, werden die Materialien gleichzeitig bearbeitet (Parallelstation). Die Bearbeitung der Materialien beginnt, sobald eine Schicht beginnt und Material im Taktbereich verfügbar ist.

Zum Start einer Woche, vor Schichtbeginn, passt die Materialverwaltung die Bestell- und Lieferlisten gemäß der voraussichtlichen Bedarfe und der noch vorhandenen Bestände (in den Taktbereichen und dem Materiallager) für die beginnende Woche an (siehe Abbildung 6-12). Das Vorgehen entspricht dem Bestellverhalten der Gewerkeleitungen.

Dazu werden in den Taktbereichen, in denen sich überschüssiges Material befindet, die benötigten Materialien für die Woche ermittelt. Das benötigte Material wird mit dem Bestand zum Ende der Woche verglichen. Überschüssiges Material wird anhand der Prioritätsregeln

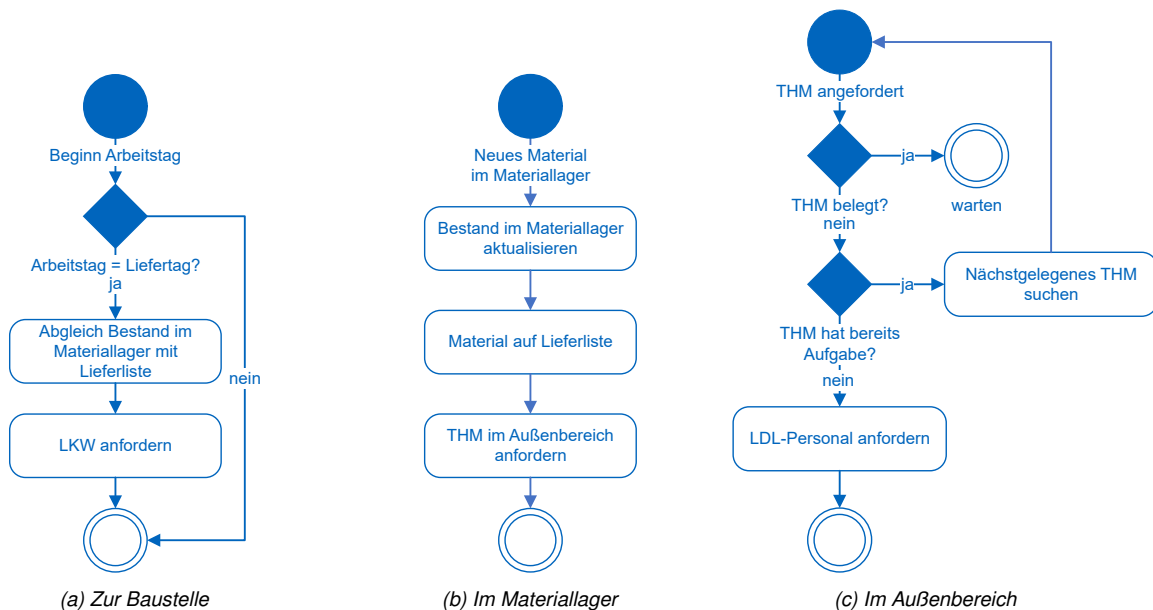


Abbildung 6-11: Versorgungslogik (eigene Darstellungen nach [fml-2021])

in Abschnitt 6.2.2 zugeteilt. Ändert sich der Taktbereich, wird der Materialbedarf für die anstehenden Tätigkeiten der folgenden Woche in der Lieferliste reduziert. Kommt es zu Änderungen in der Lieferliste, muss auch die Bestellliste entsprechend korrigiert werden. Die neue Zuteilung des Materials in einen anderen Taktbereich oder in das Materiallager erfolgt über die Änderung des Ziels des LHMs, auf dem das Material geladen ist.

Ist eine Tätigkeit im Taktbereich beendet und wird dazu nicht alles gelieferte Material benötigt, prüft die Materialverwaltung die Ziele der verbleibenden LHMs. Falls das Material nicht für die folgenden Wochen im aktuellen Taktbereich benötigt wird, wird das THM auf dem Geschoss angefordert (siehe Abbildung 6-12).

Entsorgung

Die Entsorgungsverwaltung in den Taktbereichen prüft, ob Leerpaletten aus dem Materialtransport oder Abfall von den Gewerken vorliegen. Beide werden einmal täglich eingesammelt (siehe Abbildung 6-12). Dazu werden Aufträge zunächst an das horizontale THM bzw. EHM auf dem jeweiligen Regelgeschoss gestellt. Die Aufträge können bearbeitet werden, wenn die Ressource inkl. das dazu benötigte LDL-Personal frei sind.

Nach Schichtende des letzten Tages einer Woche wird über die Materialverwaltung das überschüssige Material im Materiallager vernichtet. Übertragen in die Praxis bedeutet dieser Vorgang, dass die Gewerke die restlichen Materialien selbst entsorgen.

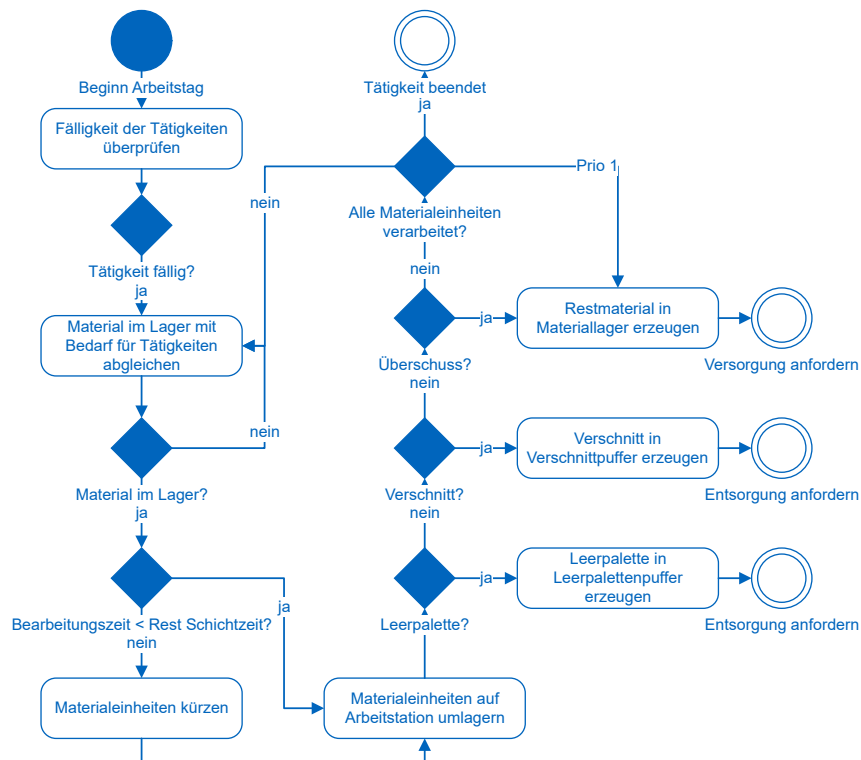


Abbildung 6-12: Produktions- und Entsorgungslogik für die Materialverarbeitung in den Taktbereichen (eigene Darstellung nach [fml-2021])

Geräte

Ein LKW wird von der Materialverwaltung angefordert (siehe Abbildung 6-10). Die Anforderung erfolgt nur an den vorgesehenen Liefertagen und nur im Zeitraum von Beginn eines Arbeitstages bis eine Stunde vor Schichtende als Zeitpuffer für das Abladen. Anhand der obersten Zeile in der Bestellliste wird das Material und die dafür benötigten LKW auf einer Station außerhalb der Baustelle erzeugt. Dabei wird ausschließlich das Material erstellt, das in der aktuellen KW benötigt wird. Damit entspricht die Erzeugung eines LKWs einer Materialbestellung eines Gewerks. Diese Aufgabe des LKWs ist in Abbildung 6-13 skizziert.

Anhand der vorgegebenen TEs werden die Materialien auf der Ladefläche des LKWs als TG erzeugt. Sobald eine Einheit auf dem LKW erzeugt ist, wird die Zeile in der Bestellliste entsprechend angepasst bzw. gelöscht, wenn alle Einheiten erzeugt sind. Die TEs haben eine ausgewiesene Lagerfläche. Die Einheiten werden nicht gestapelt. Reicht die Kapazität der Lagerfläche des LKWs nicht aus, wird ein neuer LKW angefragt. Enthält die Bestellliste keine Zeilen mehr mit Materialien des selben Gewerks und mit Lieferdatum der aktuellen KW, wird der LKW zur Entladezone auf der Baustelle geschickt. Dort wird er, abhängig von den vorab eingestellten Schwierigkeitsgraden, entladen. Bilden sich nach Schichtende

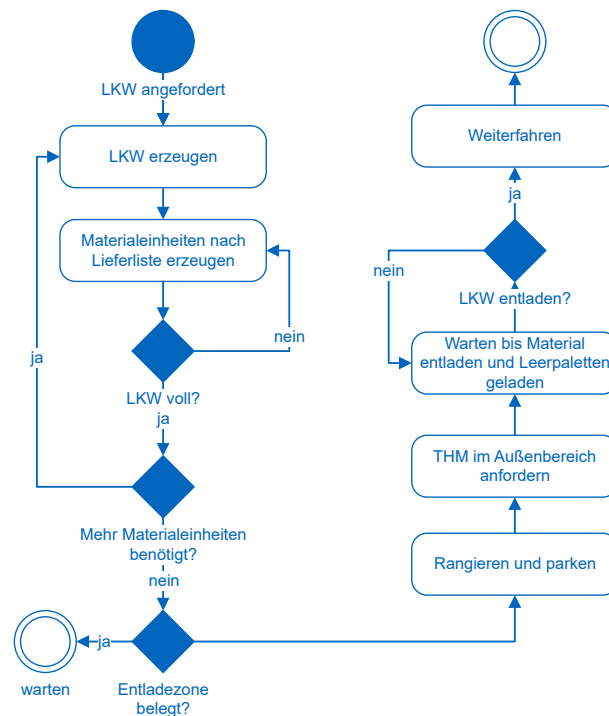


Abbildung 6-13: Geräteverwaltung: Aufgaben des LKWs (eigene Darstellung nach [fml-2021])

noch LKW-Schlangen vor der Entladezone, sind diese, aufgrund des o. g. Lieferzeitraums, auf die Einschränkungen bei der Belegung von logistischen Ressourcen auf der Baustelle zurückzuführen.

Die horizontalen THMs sind für alle logistischen Aufgaben auf der Baustelle zuständig. Die Parkpositionen sind neben dem Materiallager und neben den Aufzügen. Sie werden pro Geschoss mit Hilfe einer Auftragsliste verwaltet, in die neue Aufträge eingeschrieben werden, z. B. schreibt der LKW sich in die Liste ein, sobald er die Entladezone erreicht hat und damit bereit ist für die Entladung (siehe Abbildung 6-13). Die Geräteverwaltung weist dem räumlich am nächsten stehenden freien THMs die Aufgabe zu. Das THM übernimmt die Aufgabe als Zustandsvariable. Ist eine Aufgabenzuweisung nicht möglich, kann die Aufgabe nicht ausgeführt werden und verbleibt in der Liste. Die Prüfung und Zuweisung der Aufgaben erfolgt bei jeder neu eingeschriebenen Aufgabe und bei jedem frei werdenden THM. Dadurch ist die Aufgabenverteilung auf mehrere mögliche THMs sichergestellt.

Personal

Das Personal ist zweigeteilt in LDL- und Gewerke-Personen, die unabhängig von einander agieren. Die LDL-Personen empfangen Aufgaben über die Prozessverwaltung bzw. über Geräte wie Hubwagen, die eine Bedienung erfordern. Die Gewerke-Personen erfüllen keine Aufgaben. Sie dienen rein dem Zweck eine realistische baulogistische Belastung zu simulieren wie durch die Auslastung der Aufzüge in den Pausen- und zu den Schichtzeiten.

Die Anzahl des LDL-Personals ist ein Parameter, der zu Beginn des Simulationslaufs bestimmt wird. Über die Personalverwaltung werden dem LDL-Personal einzelne Aufgaben nach dem FIFO-Prinzip zugewiesen (siehe Abbildung 6-14). Es gibt nur eine Aufgabe pro Person. Die Aufgabenzuweisung ist personenunabhängig. Wie das Gewerke-Personal hält sich auch das LDL-Personal an die festgelegten Arbeitszeiten. Aufgaben werden zu Schichtende gestoppt und am nachfolgenden Tag zu Schichtanfang wieder fortgesetzt. Ausnahme bilden Aufgaben, bei denen Material umgeschlagen wird. Die Aufgabe wird über das Schichtende fortgesetzt, bis das Material vollständig vom THM entladen ist.

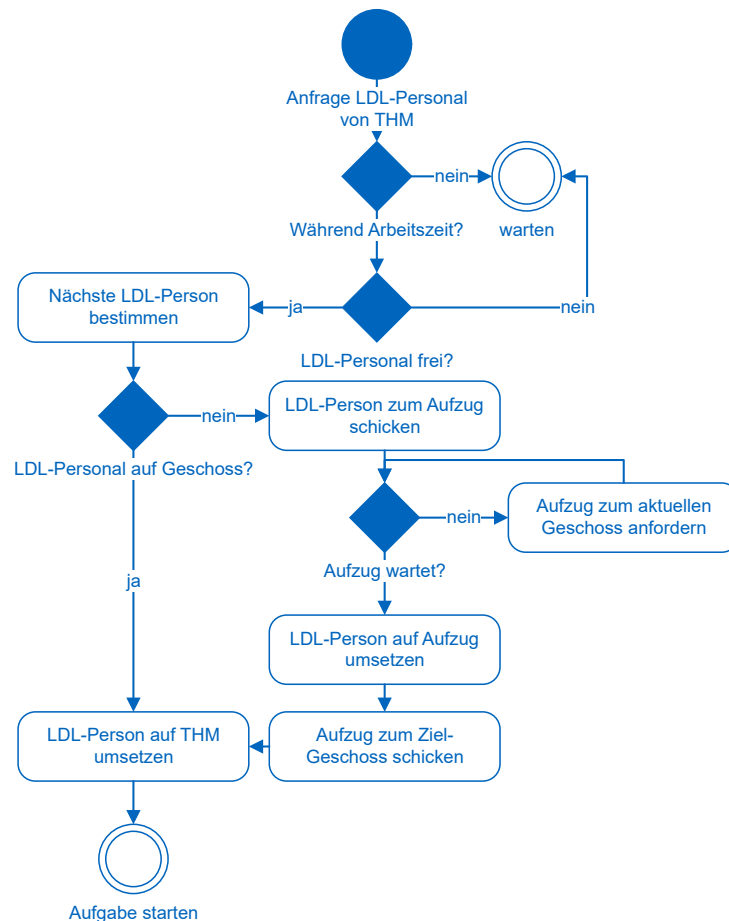


Abbildung 6-14: Personalverwaltung: Aufgabenverwaltung beim LDL-Personal (eigene Darstellung nach [fml-2021])

6.3.5 Verifikation und Validierung

Die Verifikation der Implementierung der Simulationslogik erfolgt durch Begrenzung der Eingangsdaten, z. B. werden nur zwei Materialien angenommen, an denen eine einfache Nachrechnung von der anzunehmenden Lagerfläche möglich ist. Es werden Plausibilitätschecks zur Validierung der Prozessabläufe in regelmäßigen Treffen mit dem Industriepartner durchgeführt und mit den Ergebnissen des linearen Berechnungsmodells von Dengler [Den-2020] verglichen. Die vereinfachte grafische Darstellung der unterschiedlichen Ressourcen

(Personal, Geräte, Materialien und Layout) unterstützt dabei. Die Robustheit des Systems wird durch das Provozieren von extremen Situationen getestet, z. B. durch eine Entladung eines LKWs, die länger als bis zum Schichtende dauert.

Die am Hochbauprojekt 1 validierte Robustheit kommt bei der Übertragung auf das Hochbauprojekt 2 an Grenzen. Die erhöhte Anzahl an Geschossen und Taktbereichen sowie das damit verbundene erhöhte Materialaufkommen (siehe Tabelle 6-1) führen zu einem deutlich erhöhten Verkehrsaufkommen. Die gleichbleibende Anzahl an THMs kann diese Dynamik nicht abfangen. Blockaden entstehen z. B. durch die Schnittstellen an den vertikalen und horizontalen THMs. Die horizontalen THMs sind jeweils für die Be- und Entladung der vertikalen THMs zuständig. Ist kein horizontales THM dafür frei, kommt es zur Blockade, da die Aufgabe nicht zugewiesen werden kann (siehe Abbildung 6-11c). Gleichzeitig muss auch freies LDL-Personal zur Verfügung stehen. Für das Hochbauprojekt 1 werden diese Blockaden durch die Nutzung von Puffern gelöst. Für das Hochbauprojekt 2 reicht diese Lösung nicht aus. Zudem kommt es zu Blockaden bei der Schnittstelle zu den LKWs aufgrund der erhöhten Anzahl an Materialanlieferungen. Diese festgestellten Herausforderungen bei der Übertragung des modularen Simulationsmodells vom Hochbauprojekt 1 auf das Hochbauprojekt 2 führen dazu, dass die nachfolgenden Bausteine für die Datensammlung und -aufbereitung getrennt vom Baustein der Datennutzung betrachtet werden.

6.4 Datensammlung

Im Hochbauprojekt 2 wird die Materialanlieferung durch eine Avisierungssoftware des Industriepartners [DAT-2023; Züb-2020] erfasst. Die Software dient der internetbasierten Erfassung der Materialbestellungen der einzelnen Gewerke (siehe Abschnitt 2.2.3). Diese Datensammlung und die anschließende Datenaufbereitung im nachfolgenden Abschnitt 6.5 konnten in Zusammenarbeit mit dem Industriepartner während der Ausführung des Hochbauprojekts 2 begleitet werden. Aufgrund dessen erfolgt die Umsetzung nur am Hochbauprojekt 2 (siehe Abbildung 6-15).

Die verwendete Software ermöglicht, die Anlieferungen auf die Baustelle digital zu verwalten und zu überwachen. Die Gewerke sind angehalten, ihre Materialanlieferungen manuell über die Software anzumelden. Die folgenden Informationen können abgefragt werden:

- Zeitfenster für die Anlieferung;
- Anzahl der Anlieferungen;
- Anzahl und Art der LHMs des angelieferten Materials.

Weitere Informationen wie der Taktbereich, zu dem das Material transportiert werden muss, oder die Art und Anzahl an THMs, die für den Transport benötigt werden, wurden nicht abgefragt.

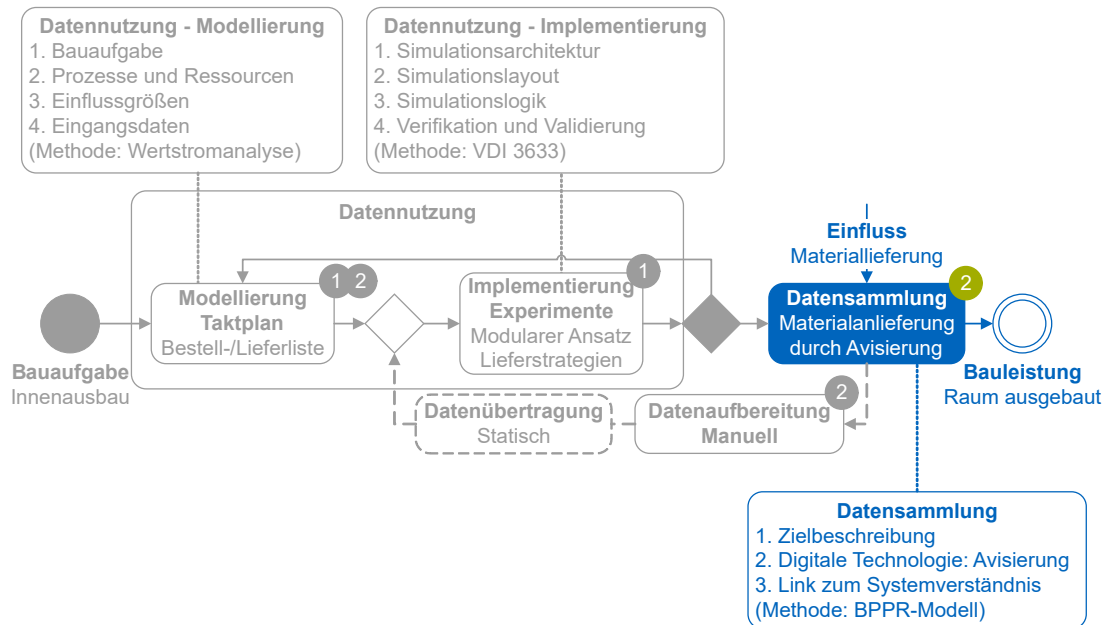


Abbildung 6-15: Baustein für die Datensammlung des Digitalen Zwillings am Hochbauprojekt 2 (blau; eigene Darstellung)

Insgesamt dient dieser Informationsaustausch der Transparenz und der Koordination zwischen den entkoppelten Gewerken der Produktion und Logistik, um eine optimale Planung und Ausführung der Anlieferungen von Materialien im Sinne von JIT zu gewährleisten. Das BPPR-Modell in Abbildung 6-16 zeigt diese Vorgänge im Kontext des vorhandenen Bauproduktionssystems auf.

Im BPPR-Modell wird die Datensammlung für die Anlieferung von Materialien (Prozess) für den Innenausbau eines Raums (Produkt) mit Hilfe der Avisierungssoftware verdeutlicht. Die Avisierung erfolgt zunächst über den Einkauf. Sobald die Materialien auf die Baustelle geliefert werden, werden sie vom LDL-Personal mit Hilfe eines Teleskopladers (Ressource) abgeladen. Dieser Vorgang startet die manuelle Registrierung des Materials (Daten). Die übermittelten Informationen entsprechen der Bestellliste. Sie werden bereits bei der Avisierung erfasst. Ein Abgleich mit der Lieferliste löst den JIT-Vorgang für den entsprechenden Taktbereich aus. Nach erfolgreicher Einlagerung im Taktbereich wird die Leerpallette wieder mitgenommen. Die Registrierung erfolgt rein manuell. Das Material oder der Hubwagen werden nicht in die digitale automatisierte Datensammlung miteinbezogen.

6.5 Datenaufbereitung

Aufbauend auf der Datensammlung für die Materialanlieferung im Hochbauprojekt 2 wird eine Datenaufbereitung durchgeführt (siehe Abbildung 6-17). Ziel ist es, die avisierten Ist-Daten

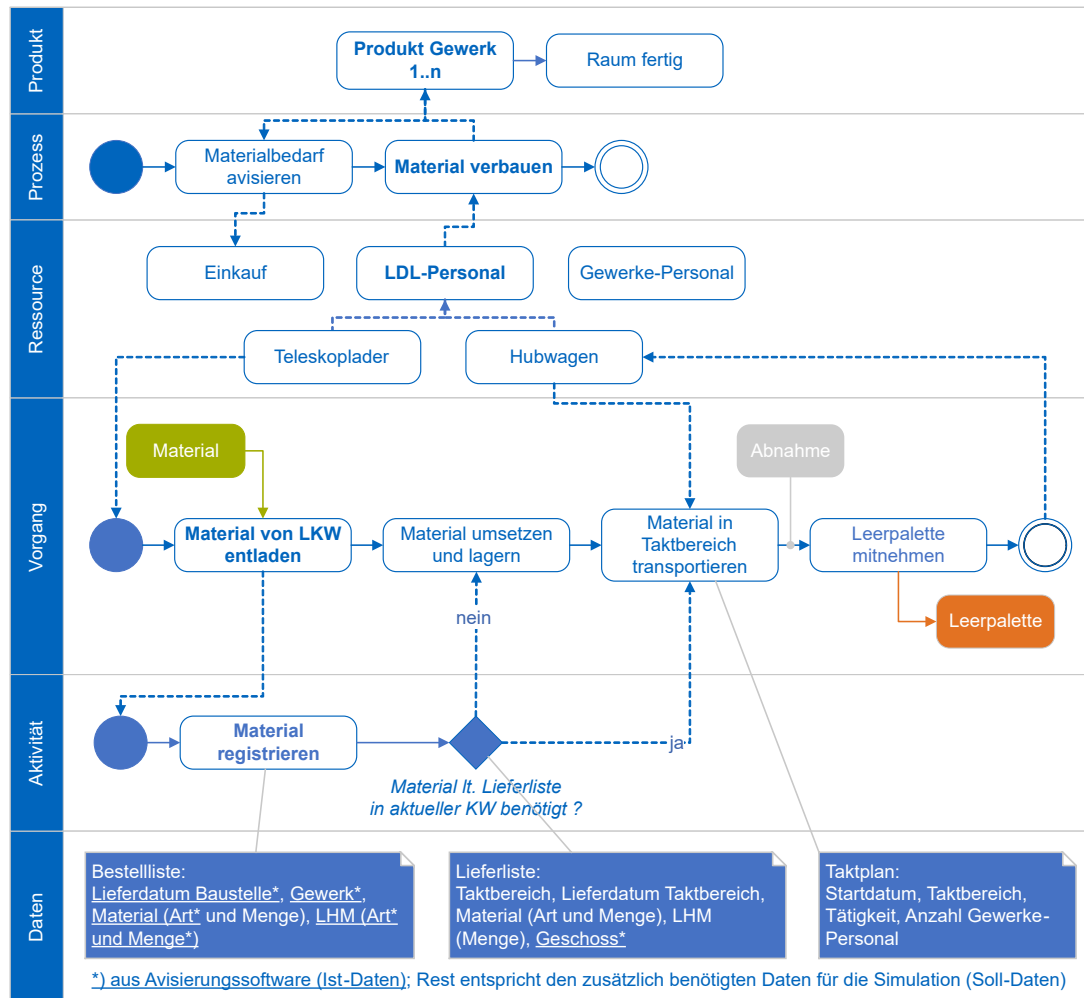


Abbildung 6-16: Bau-Produkt-Prozess-Ressourcen-Modell mit Fokus auf der Anlieferung für ein Gewerk mit Hilfe der Avisierungssoftware im Hochbauprojekt 2 (grün: Versorgung; orange: Entsorgung; grau: Qualitätskontrolle; eigene Darstellung)

aus dem vorangegangenen Baustein zur Datensammlung in Abschnitt 6.4 so aufzubereiten, dass ein Vergleich mit den ursprünglich geplanten Soll-Daten als Eingangsdaten für die Simulation erfolgen kann.

Die Vorgehensweise für die Datenverarbeitung ist manuell und basiert auf Erfahrungswerten. Gleiches gilt für die Merkmalsextraktion und -auswahl sowie für die Klassifizierung der Materialien zur Ableitung der Materialanlieferungen auf die Baustelle per LKW. Anpassungen hinsichtlich Verschiebungen im Terminplan und der Aufwandswerte können nicht berücksichtigt werden, da dazu keine Daten vorliegen.

Insgesamt dient dieser Abschnitt dazu, die Herausforderungen bei der Datenaufbereitung für die Simulation aufzuzeigen. Eine spätere Übertragung in die Simulation erfolgt nicht, da die Generalisierbarkeit des Hochbauprojekts 1 auf das Hochbauprojekt 2 aufgrund der Herausforderungen in Abschnitt 6.3.5 nicht gegeben ist.

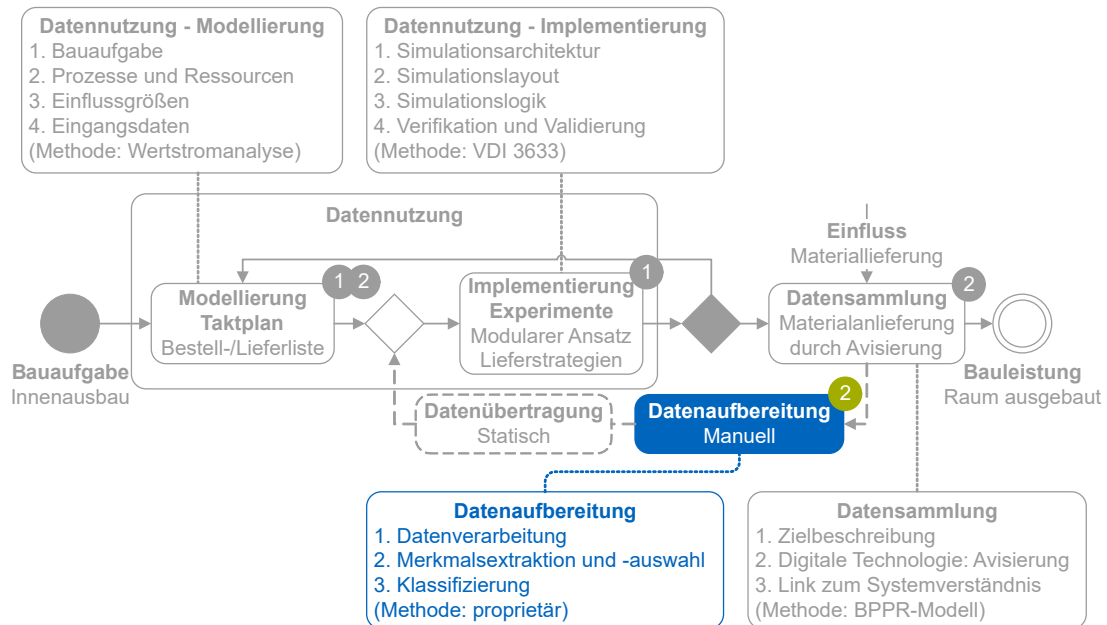


Abbildung 6-17: Baustein für die Datenaufbereitung des Digitalen Zwillings am Hochbauprojekt 2 (blau; eigene Darstellung)

Als Basis dienen die folgenden Ist-Daten aus der Avisierungssoftware (siehe Daten in Abbildung 6-16):

- Lieferdatum auf die Baustelle;
- Art des Materials;
- Anzahl und Art der LHMs pro Gewerk.

Angaben zur bestellten Materialmenge oder zu den Taktbereichen, wie sie für die Eingangsdaten der Simulation in Abschnitt 6.2.5 benötigt werden, liegen nicht vor (siehe nicht unterstrichene Angaben in der Lieferliste und der Bestellliste in Abbildung 6-16).

Zunächst werden aus dem Lieferdatum auf die Baustelle die LKWs pro KW abgeleitet. Abbildung 6-18 zeigt den Verlauf dieser avisierten Ist-Daten (grau) im Vergleich zu den Soll-Daten (blau) aus Abschnitt 6.2.5 über den Projektzeitraum.

Der Verlauf der Ist-Daten (grau) zeigt anfangs einen Anstieg und zum Ende des Projektzeitraums ein Abflachen der Anlieferungen. Dazwischen ist zu zwei Zeitpunkten, die die Jahreswechsel markieren, ein Rückgang der LKWs pro KW auf Null zu erkennen (KW 33 und 85). Insgesamt ist dieser Verlauf typisch für die Materialanlieferung bei einem Hochbauprojekt.

Beim Vergleich mit den Soll-Daten (blau) aus Abschnitt 6.2.5 zeigt sich eine Diskrepanz in der Anzahl der LKWs sowie im Verlauf der Anlieferungen über die Zeit. Der zweite Hochpunkt in den Soll-Daten (KW 56), ausgelöst durch den zusätzlichen Innenausbau des Turms, wird nicht widerspiegelt. Ein Grund dafür ist zum einen, dass nicht von allen Gewerken avisierte Ist-Daten von deren Bestellungen vorliegen. Von ursprünglich 49 angenommenen

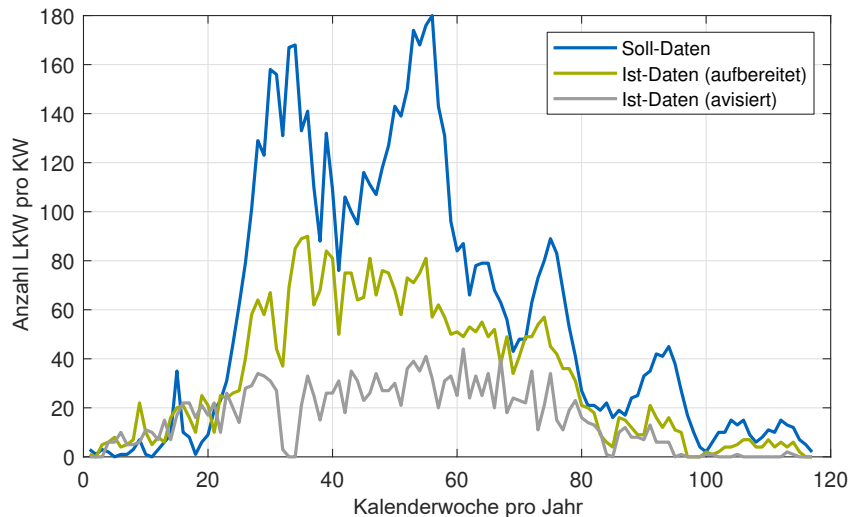


Abbildung 6-18: Vergleich der Anzahl an ankommenden LKWs für das Hochbauprojekt 2 (eigene Darstellung nach [fml-2023b])

Materialarten können nur 25 zu den insgesamt 17 avisierten Materialarten zugewiesen werden. Zum anderen weisen die Soll-Daten Vereinfachungen hinsichtlich der LKW-Beladung auf, wie eine Anlieferung pro Gewerk und eine bedarfsorientierte maximale Ladefläche.

Um den Einfluss dieser Annahmen zu untersuchen, werden die Ist-Daten (grau) so aufbereitet (grün), dass sie mit den Soll-Daten (blau) vergleichbar werden. Dazu werden aus dem Lieferdatum auf die Baustelle und den gelieferten LHMs pro Material und Gewerk die LKWs pro KW abgeleitet.

Zur Vergleichbarkeit werden die Materialbezeichnungen der Ist-Daten in die Bezeichnungen der Simulationslogik überführt (Datenverarbeitung). Anschließend werden die Soll-Bestellungen, für die Ist-Daten vorliegen, angepasst (Merkmalsextraktion und -auswahl). Dabei wird die Anzahl der LHMs pro Bestellung durch die entsprechenden Ist-Daten ersetzt, aus denen die Materialmenge abgeleitet wird. Liegt keine ausreichende Datenqualität vor, z. B. bei Doppelbuchungen oder fehlenden Mengenangaben zu LHMs, erfolgt die Anpassung basierend auf Erfahrungswerten, z. B. kann aus der Angabe für das Zeitfenster der Anlieferung auf die Anzahl der gelieferten LHMs für ein Gewerk geschlossen werden. Eine Übersicht der Soll- und Ist-Daten, bezogen auf die avisierten Materialien, zeigt Tabelle B-1 in Anhang B.

Für den Vergleich der Eingangsdaten in die Simulation werden die so aufbereiteten Ist-Daten mit den Soll-Daten, für die keine Ist-Daten vorliegen, ergänzt (aufbereitete Ist-Daten). Pro Bestellung wird vereinfacht ein LKW mit der dafür erforderlichen maximalen Ladefläche eingesetzt (Klassifizierung). Insgesamt können so 40 % der Soll-Bestellungen mit Ist-Daten aktualisiert werden.

Beim Vergleich der Soll-Daten (blau) mit den aufbereiteten Ist-Daten (grün) in Abbildung 6-18 zeigt sich eine höhere Übereinstimmung als im Vergleich mit den avisierten Ist-Daten (grau). In beiden Fällen ist der Verlauf der Ist-Daten deutlich gleichmäßiger. Insgesamt zeigt sich, dass die Soll-Daten die Anzahl an LKWs überschätzen.

Tabelle 6-2 quantifiziert diese Überschätzung und vergleicht die kumulierten Daten über den Projektzeitraum.

Tabelle 6-2: Vergleich von Soll- und Ist-Daten für das Hochbauprojekt 2 (eigene Darstellung)

	Soll-Daten	Ist-Daten (aufbereitet)
Anzahl LKWs	6692	3618 (–46 %)
Anzahl LHMs	22.253	19.293 (–13 %)
Anzahl Materialien	1.239.563	1.063.949 (–14 %)

Die Ist-Anzahl der LKWs halbiert sich gegenüber den Soll-Daten von 6692 auf 3618 um 46 %. Von den bestellten LHMs reduziert sich die Anzahl von 22.253 (Soll) auf 19.293 (Ist) um 13 %. Die daraus abgeleitete bestellte Anzahl an Materialien reduziert sich von 1.239.563 (Soll) auf 1.063.949 (Ist) um 14 %.

Neben der fehlenden Datenmenge und -qualität, besteht ein Zusammenhang mit der ursprünglich angenommenen JIT-Anlieferung. Die geringere Ist-Anzahl an LKWs bei ungefähr gleichbleibender Anzahl an LHMs bestätigt Beobachtungen aus der Praxis, dass es zu Sammelbestellungen kommt. D. h. Bestellungen werden über mehrere Taktzyklen zusammengefasst. Werden in der Planung die LKWs nach den Bedarfen der jeweiligen Taktbereiche auch teilbeladen bzw. auf eine einheitliche maximale Ladefläche beschränkt, sind die LKWs in der Praxis meist vollbeladen, um z. B. die Kapazität der LKWs oder die Anreize von Sammelbestellungen auszunutzen. Die Anlieferstrategie der Praxis erfüllt so dem Zweck des einzelnen Gewerks (Optimierung durch Sammelbestellung), aber nicht dem des Gewerkezugs (bedarfsorientierte Anlieferung). Auswirkungen zeigen sich in der Lagerflächenausnutzung.

Insgesamt legt die Datenaufbereitung Abweichungen zwischen den ursprünglich geplanten Soll- und Ist-Daten für die Materialanlieferung des Hochbauprojekts 2 offen. Änderungen der Anlieferungen während den Bauphasen werden quantifizierbar. Im vorliegenden Hochbauprojekt 2 kann so gezeigt werden, dass die vorausgesetzte Anlieferstrategie nach JIT in der Praxis nicht erfüllt wird.

Die aufgezeigte Datenaufbereitung weist Limitationen auf, die auf nicht-standardisierte Prozesse für die Anlieferung in der Praxis zurückzuführen sind. Zum einen ist die Qualität der Erfassung der LHMs in der Avisierungssoftware stark abhängig von den Gewerken. Insgesamt fehlen standardisierte Definitionen für die Bezeichnungen und Kapazitäten der möglichen THMs und LHMs. Für zukünftige Avisierungen kann das BPPR-Modell in Abbildung

6-16 unterstützen ein einheitliches Systemverständnis sowie eine eindeutige Bezeichnung festzulegen (*Prozess*: Wann wird avisiert? *Produkt*: Was wird avisiert? *Ressource*: Wer avisiert? *Daten*: Wie wird avisiert?). Zum anderen wird der Taktplan in der Praxis mehrfach angepasst, um auf Bauverzögerungen zu reagieren. Zu den Änderungen im Taktplan liegen keine ausreichenden Daten vor. In zukünftigen Untersuchungen müssen daher aktuelle Daten über die Änderungen im Taktplan erfasst werden, um die Ist-Daten umfassend in der Simulation nutzen zu können.

6.6 Experiment

Das nachfolgende Experiment greift die Ergebnisse aus dem Vergleich der Soll- und Ist-Datenaufbereitung auf und vergleicht den Einfluss von Anlieferstrategien auf die Produktionslogistik. Allerdings erfolgt die Durchführung der Experimente exemplarisch am implementierten Referenzmodell des Hochbauprojekts 1 (siehe Abschnitt 6.3).

Abbildung 6-19 zeigt das methodische Vorgehen für den letzten Baustein der Datennutzung.

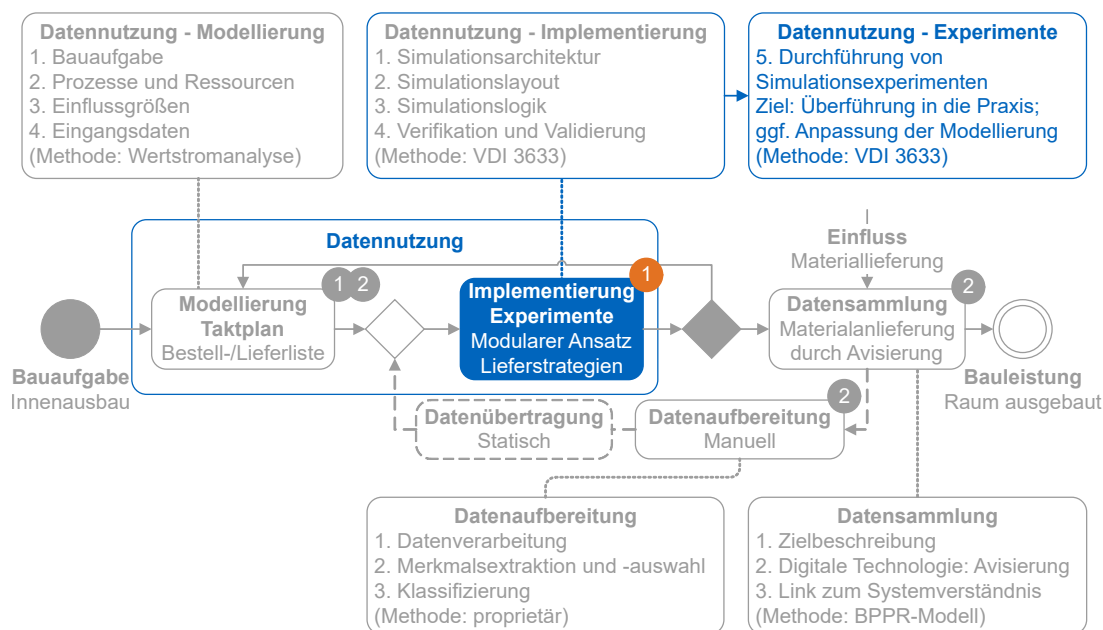


Abbildung 6-19: Baustein für die Durchführung des Experiments am Digitalen Zwilling des Hochbauprojekts 1 (blau; eigene Darstellung)

Das Referenzmodell des Hochbauprojekts 1 stellt die JIT-Anlieferung dar, d. h. die Anlieferung der Materialien auf den entsprechenden LHMs erfolgt bedarfsgerecht auf die Baustelle. Für die Versorgung der Produktion auf der Baustelle werden die Materialien in zwei Kategorien in Abhängigkeit ihrer LHMs eingeteilt: (1) Materialien, die im Materiallager geteilt werden können (z. B. einzelne Farbeimer pro Palette) und (2) solche, die nicht geteilt werden können (z. B. Gipskartonplatten).

Die Aufteilung der TEs auf mehrere LHMs im EG und das mehrfache Umlagern von überschüssigem Material in den Taktbereichen ist im Sinne von Lean Construction als nicht wertschöpfend anzusehen [Baj-2017]. Gleichzeitig stellt es einen Kompromiss zwischen Praxis und Idealzustand dar.

Off-Site-Kitting, kurz Kitting, ist ein Ansatz der Materialanlieferung, um dem entgegenzuwirken. Der Kitting-Ansatz basiert auf der vorherigen Zusammenstellung der Materialien in einem Konsolidierungszentrum abseits der Baustelle. Im Konsolidierungszentrum werden die Materialien entsprechend der Lieferliste jedes Taktbereichs für die Folgewoche aufgeteilt und in den jeweiligen TEs auf LHMs zusammengestellt. Auf der Baustelle werden die LHMs ohne weiteren Aufwand im Materiallager zum entsprechenden Taktbereich transportiert. Das Umlagern von überschüssigem Material entfällt. Vereinfacht wurde angenommen, dass die Bestellliste der Lieferliste entspricht ohne Unterscheidung nach dem Gewerk. Damit können die LKW gewerkeunabhängig beladen werden.

Die Simulationsergebnisse des Kitting-Ansatzes im Vergleich zum Referenzmodell mit dem JIT-Ansatz zeigt Abbildung 6-20.

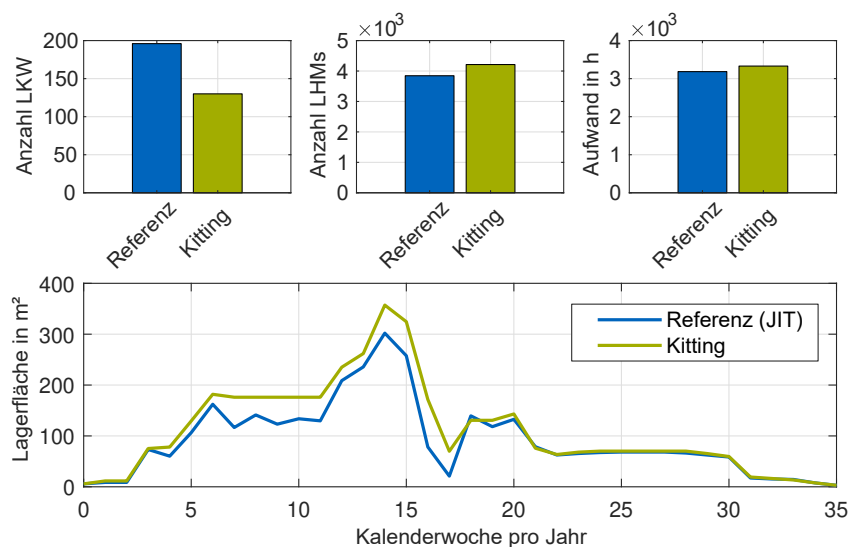


Abbildung 6-20: Ergebnisse der Simulation für das Referenzmodell am Hochbauprojekt 1 mit dem JIT-Ansatz im Vergleich zum Experiment mit dem Kitting-Ansatz (eigene Darstellung nach [Gsc-2021])

Es zeigt sich, dass die Anzahl der LKWs, die die Baustelle mit Material beliefern, um 34 % reduziert wird, wobei die Anzahl der angelieferten LHMs um 10 % steigt. Die Unterschiede ergeben sich aus den Modellierungsannahmen und dem daraus resultierenden Modellverhalten. Im Referenzmodell findet die Materialumlagerung für die einzelnen Taktbereiche im Materiallager auf der Baustelle statt. Benötigt eine Tätigkeit für einen Taktbereich nur einen Teil des Materials eines LHMs und ist das Material aufteilbar, dann wird dieser Teil für jeden Taktbereich auf die entsprechenden LHMs umgelagert.

Im Kitting-Modell wird in diesem Fall auf die Baustelle auch nur diese eine Materialeinheit pro LHM angeliefert. Durch die gewerkeunabhängige Anlieferung ergibt sich ein niedrigeres Aufkommen an LKWs. Gleichzeitig zeigt sich ein erhöhtes Aufkommen an LHMs mit einem erhöhten Platzbedarf auf den Lagerflächen, da es kein Überschussmaterial gibt, was umgelagert und weiter verwendet werden kann.

Durch die zusätzlichen LHMs entsteht ein erhöhter logistischer Aufwand. Gleichzeitig reduziert sich der logistische Aufwand, da die Materialumlagerung auf der Baustelle entfällt. Auch die Umlagerung des überschüssigen Materials, was in den Tätigkeitsbereichen nicht verbraucht wird, entfällt. Daher wird zusätzlich der Aufwand des LDL-Personals betrachtet. Der Vergleich zeigt, dass die Logistikstunden um 5 % steigen. Damit zeigt sich, dass der reduzierte Aufwand von ideal vorbestückten LHMs beim Kitting, insgesamt zu einem erhöhten Mehraufwand durch die Materialanlieferung der dadurch zusätzlich benötigten LHMs führt.

6.7 Diskussion

Auf der Grundlage der vorgestellten Annahmen und der Simulationsmodellierung mit den vom Industriepartner bereitgestellten Daten zeigt sich das Kitting-Modell als nicht vorteilhaft. Aufgrund der erhöhten Anzahl der an die Baustelle gelieferten LHMs erhöht sich der Logistikaufwand gegenüber dem Referenzmodell.

In der Praxis hat sich jedoch gezeigt, dass Kitting den Bauprozess verbessert [You-2004]: Es reduziert die Menge an überschüssigem Material auf der Baustelle und den Aufwand für das (Wieder-)Auffinden von Materialien sowohl im Materiallager als auch in den Taktbereichen. Die Materialverwaltung wird dadurch verbessert, dass die Anlieferungen dem Materialbedarf pro Taktbereich entsprechen. Der koordinierte Materialfluss führt zu einer Verbesserung der Liefertreue, da alle Materialien auf der Baustelle ein definiertes Endziel haben. Dies wiederum verringert die Zahl der Aufgaben, die sich aufgrund von nicht vorhandenem Material verzögern, und erhöht somit die Zahl der rechtzeitigen Aufgabenerledigungen [You-2004, Abb. 9]. Eine Erweiterung des Modells sollte Elemente enthalten, um die Auswirkungen der Materialversorgung auf die Leistung der Produktion in den Taktbereichen zu untersuchen, z. B. durch Störfaktoren oder eine Pull-Strategie für relevante Anlieferungen.

Der entwickelte Simulationsansatz bildet die Materialflüsse der Ver- und Entsorgung beim Innenausbau von Hochbauprojekten ab. Für den modularen Ansatz wurden Bibliotheken als Simulationsbausteine entwickelt, z. B. für die THMs bzw. EHMs, wie Aufzüge, Mülltonnen oder -container. Die Basis bildeten unternehmensspezifische Daten, da branchenweite Standards in der Baulogistik für den Innenausbau fehlen. Die Anwendung der Simulation zeigt deren Bedeutung und Vorteil auf.

Weitere Möglichkeiten der Simulation zeigt Gschwendtner [fml-2021] in ihrer Masterarbeit auf. Im Gegensatz zu bisherigen linearen Berechnungsmodellen können z. B. die Wartezeiten von LKWs analysiert werden und mit Verzögerungen durch das Zusammenspiel aus einer begrenzten Anzahl an Ressourcen (LDL-Personen, THMs) in Verbindung gebracht werden.

Ein vorgelagertes Konsolidierungszentrum wäre z. B. in der Lage, die Materialumlagerung vorzulegen, um den Logistikaufwand auf der Baustelle zusätzlich zu reduzieren. Zwar müssen dann auch die Aufwände eines Konsolidierungszentrum mitberücksichtigt werden, allerdings kann dieser Lösungsansatz ggf. bei besonders ausgelasteten Baustellen mit wenig logistischen Kapazitäten von Vorteil sein. Um den Aufwand in den Konsolidierungszentren sowie auf der Baustelle zu minimieren, kombinieren z. B. Heinonen und Seppänen [Hei-2016, Abb. 2] zusätzlich die Materialien, die für eine Tätigkeit in einem Taktbereich benötigt werden in standardisierten TEs. Eine weitere Verbesserung könnte durch die Umsetzung einer JIT-Anlieferstrategie direkt in die Taktbereiche erzielt werden. Durch die direkte Anlieferung von Materialien an die Taktbereiche, ohne sie im Materiallager im EG zwischenzulagern, würde sich der Logistikaufwand reduzieren.

Trotz des Einsatzes einer Avisierungssoftware, ist das bisherige Vorgehen zur Datensammlung und -aufbereitung stark manuell und fehleranfällig. Eine Umfrage im Rahmen der von der Autorin betreuten Semesterarbeit von Grimm [fml-2023b] zeigt im operativen Bereich Herausforderungen auf, z. B. die zeitliche Abstimmung mit den Lieferunternehmen der Gewerke, fehlende Kapazitäten für die Anmeldung von Anlieferungen oder interne Informationsverluste. Dadurch liegen teilweise unvollständige Datensätze je Gewerk vor. Schulungen zur Aufklärung der gewissenhaften Nutzung des Tools könnten in Zukunft die Qualität der Daten erhöhen. Erste automatisierte Lösungsansätze zur Datensammlung und -aufbereitung zeigen z. B. Kosse et al. mit Hilfe von KI-basierter Objekterkennung [Kos-2024]. Datentreuhandmodelle auf Basis von OPC-UA [Kos-2024] oder internetbasierte Plattformen auf Basis von BIM [Jur-2024] sind aufgrund der verschiedenen Beteiligten in Zukunft zu untersuchen.

Insgesamt zeigt das Anwendungsbeispiel die Umsetzung und Bewertung der Bausteine für die Datensammlung und -nutzung mit Hilfe des Vorgehensmodells. Die Entwicklung zeigt einen hohen komplexen Grad der Simulation. Die Entwicklung des modularen Simulationsmodell wurde durch das aufgestellte Systemverständnis erleichtert. Die Datensammlung weist noch einen sehr hohen manuellen Anteil auf. Die Ergebnisse verdeutlichen eine Überschätzung der Soll-Daten. Außerdem lassen sich damit die Inkonsistenzen der ursprünglich geplanten JIT-Anlieferstrategie in der Praxis quantifizieren. Übertragen auf die Simulation wird deutlich, dass eine Aktualisierung der ursprünglich geplanten Eingangsdaten zwingend erforderlich ist, um die Änderungen während der Bauphase zu berücksichtigen. Auch ohne eine Dateneinbindung in die Simulation konnte das Anwendungsbeispiel das Potenzial verschiedener Anlieferstrategien aufzeigen. Für eine baubegleitende Einbindung der Ist-Daten in die Simulation hilft zukünftig eine gemeinsame Systembeschreibung mit Hilfe des BPPR-Modells einzuführen.

7 Anwendungsbeispiel 3: Pfahlherstellung im Spezialtiefbau

7.1 Einleitung

Ziel des Anwendungsbeispiels im Spezialtiefbau ist die Baufortschrittsvorhersage auf Basis von automatisierter Aktivitätserkennung mit Hilfe von Sensordaten der Bohrgeräte. Aufgrund der vorliegenden Daten beschränkt sich der Gegenstand der Optimierung auf die Produktion selbst, wodurch sich wiederum Einsichten und Potenziale für eine zukünftige Ausweitung auf die Baulogistik ergeben.

Das Anwendungsbeispiel entstand im Rahmen der Forschungsprojekte Bauen 4.0, gefördert vom BMBF (Förderkennzeichen 02P17D249) und MiProcess2Twin, gefördert durch das Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie (Förderkennzeichen DIK0415/08). Maßgeblich unterstützt wurde die Autorin durch die Kollaboration mit Prof. Iris D. Tommelein vom Project Production Systems Laboratory der Universität in Berkeley, Kalifornien, gefördert durch den TUM Global Incentive Fund.

Das Anwendungsbeispiel wurde in verschiedenen Studienarbeiten entwickelt und gemeinsam veröffentlicht. Grimm [fml-2020k] analysierte das betrachtete System, woraus die gemeinsame Veröffentlichung [Fis-2021d] hervorging. Die Datensammlung und -aufbereitung mit Hilfe von ML-Modellen untersuchten die Studienarbeiten von Liang [fml-2020i], Orschlet [fml-2020j] und Bi [fml-2020m], gemeinsam veröffentlicht in [Fis-2021b]. Darauf aufbauend untersuchte Beiderwellen Bedrikow [fml-2021f] in seiner Bachelorarbeit und als studentische Hilfskraft DL-Modelle, die bereits in [Fis-2021c; Fis-2023a] gemeinsam veröffentlicht wurden. Die Middleware entwickelten Balakrishnan [fml-2020g] und Sun [fml-2022], gemeinsam veröffentlicht in [Fis-2020; Fis-2023b].

Als Anwendungsbeispiel dient ein Brückenbauprojekt für die Ortsumfahrung in Rosenheim, Deutschland. Der Industriepartner führte dabei die Arbeiten zur Herstellung der Tiefgründung aus Großbohrpfählen aus. Die Arbeiten wurden von am Projekt beteiligten Expert*innen des Bauunternehmens als auch vom Hersteller der Spezialtiefbaugeräte begleitet und validiert. Zusätzlich wurden die Arbeiten durch Interviews mit zwei weiteren Bauunternehmen im Spezialtiefbau ergänzt.

Für die Umsetzung des Anwendungsbeispiels wurde entsprechend dem Vorgehensmodell aus Abschnitt 4.2 vorgegangen (siehe Abbildung 7-1).

Die Bauaufgabe ist die Tiefgründung durch einen Pfahl. Die Bauleistung stellt die fertiggestellten Pfähle dar. Die Modellierung erfolgt auf Basis des Terminplans und der Beschreibung der herzustellenden Pfähle, die nach ihrer Fertigstellung in Bohrprotokollen dokumentiert werden.

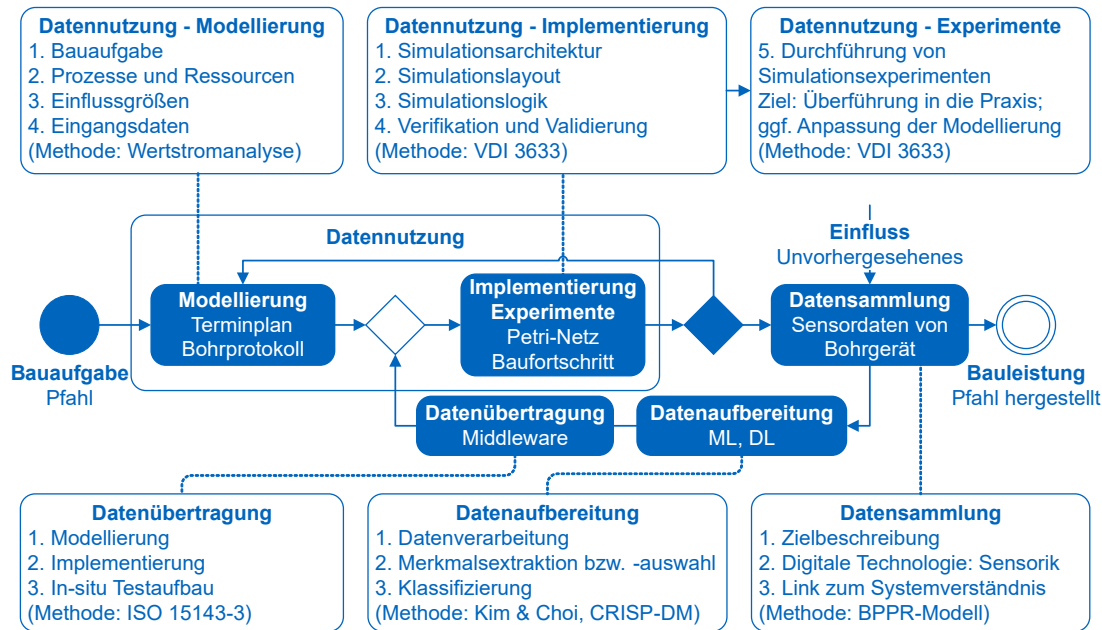


Abbildung 7-1: Umgesetzte Bausteine für den Digitalen Zwilling im Spezialtiefbau (eigene Darstellung)

Die Implementierung erfolgt als einfaches Petri-Netz zur Simulation der Bauhrittsvorhersage. Die Aussagekraft der Vorhersage wird unter Einbindung der Ist-Daten untersucht. Dazu dienen die Bausteine der Datensammlung, -aufbereitung und -übertragung. Schwerpunkt dieser Bausteine ist die Entwicklung einer möglichst automatisierten Dateneinbindung in die Simulation. Im Gegensatz zu den bisherigen Arbeiten in der Forschung (siehe Abschnitt 3.2.3) werden dazu die Daten von bereits verbauten Sensoren auf dem Gerät verwendet. Die Datenaufbereitung erfolgt mit Hilfe von KI. Die Datenübertragung wird durch die Entwicklung einer geeigneten Middleware verfolgt.

Einordnung: Anwendungsbeispiel 3

Das Anwendungsbeispiel komplementiert die beiden vorangegangenen Anwendungsbeispiele 1 und 2 und zeigt somit die **höchste Evolutionsstufe** des Vorgehensmodells auf. Es wurden alle Bausteine umgesetzt und bewertet.

7.2 Modellierung

7.2.1 Überblick

Abbildung 7-2 zeigt das methodische Vorgehen für den Baustein der Datennutzung zur Modellierung der Simulation. Zunächst erfolgt die Beschreibung der Bauaufgabe, der Prozesse und Ressourcen und der Einflussgrößen. Schließlich erfolgt die Einordnung der Eingangsdaten hinsichtlich der relevanten Kriterien für die Baufortschrittsvorhersage mit Hilfe der Simulation.



Das vorliegende Projekt ist Teil des Neubaus der Bundesstraße B15 bei Rosenheim, nahe der deutsch-österreichischen Grenze, auch „Westtangente Rosenheim“ genannt. Dieser Neubau umfasst ein Brückenbauwerk.

Die hohe Datenqualität geht auf die Besonderheiten der geologischen Gegebenheiten des vorliegenden Bauprojekts zurück, die zu einer erhöhten Dokumentationspflicht für die Herstellung der Bohrpfähle verpflichteten. Bei der vorliegenden Geologie handelt es sich um einen Rosenheimer Seeton, wodurch die Bauwerkslasten durch schwimmende Tiefgründungen in den Baugrund eingeleitet werden [Cud-2020]. Das bedeutet, dass die Bohrpfähle nicht, wie üblich, im Fels gründen, sondern allein durch die Mantelreibung gestützt werden. Es wird angemerkt, dass diese Besonderheiten im Projekt bei einer Übertragung auf weitere Pfahlprojekte berücksichtigt werden müssen.

135

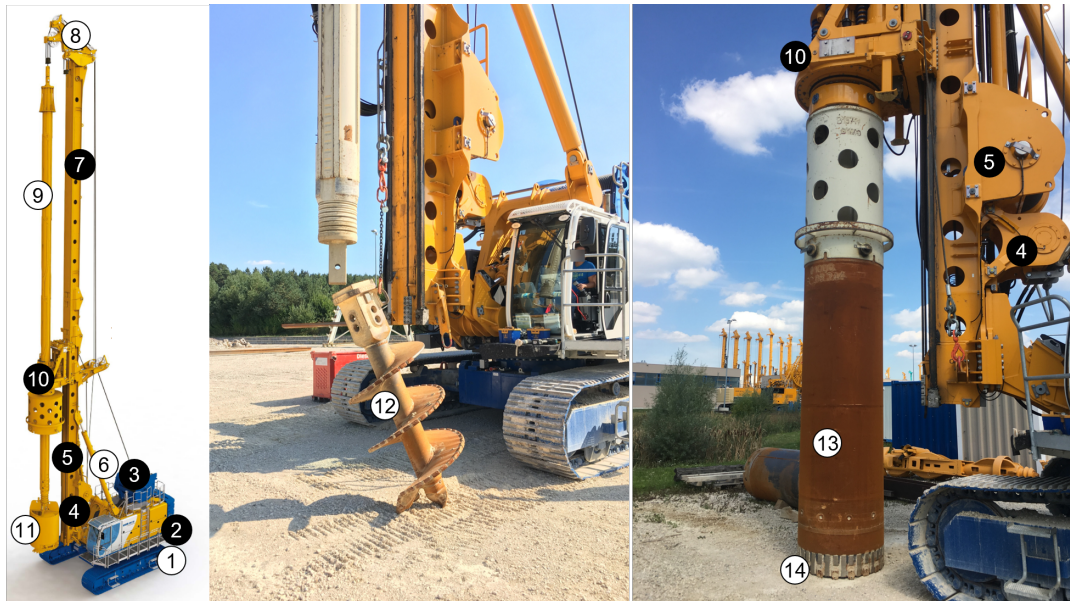


Abbildung 7-3: Beispielhaftes Bohrgerät zur Darstellung relevanter Bauteilkomponenten (weiß ausgefüllte Markierungen) und Sensoren zur Datensammlung (schwarz ausgefüllte Markierungen): (1) Unterwagen; (2) Oberwagen (Pumpendrucke); (3) Hauptwinde (Seilkraft, Geschwindigkeit und Werkzeutiefe); (4) Hilfswinde (Seilkraft); (5) Versorgungswinde (Seilkraft); (6) Kinematik; (7) Mäkler bzw. Mast (Mastneigung); (8) Mastkopf; (9) Kellystange; (10) Kraftdrehkopf (Drehmoment, Geschwindigkeit); (11) Kastenbohrer; (12) Schneckenbohrer; (13) Verrohrung; (14) Bohrschuh (Bildrechte links: Bauer AG [BAU-2023], mittig und rechts: eigene Bilder und Darstellung nach [Fis-2021d; Fis-2023a])

werden im Zeitraum von zehn Monaten hergestellt. Die Anzahl der Bohrpfähle variiert pro Achse von 5 bis 17 Pfählen mit einer Länge von 25 m bis 45 m bzw. einer Bohrtiefe von 28 m bis 52 m und einem Durchmesser von 1200 mm.

7.2.3 Prozesse und Ressourcen

Die Bohrpfähle werden nach dem Kellybohrverfahren hergestellt. Das Kellybohrverfahren ist das gängigste Bohrverfahren [Lie-2023]. Damit können Pfähle mit einem großen Durchmesser von bis zu 3 m hergestellt werden. Die Herstellung ist in DIN EN 1536 [DIN-1536] geregelt. Bei diesem Verfahren wird iterativ gebohrt, Boden gelöst und nach oben gefördert. Die Bohrgeräte verfügen dazu über einen Mäkler bzw. Mast (siehe Markierung Nr. 7 in Abbildung 7-3), an dem die sogenannte Kellystange (siehe Markierung Nr. 9 in Abbildung 7-3) aufgehängt ist. Die Kellystange ist teleskopierbar und ermöglicht so Arbeiten in Tiefen bis zu 125 m [BAU-2023; Lie-2023]. Das Lösen des Bodens erfolgt abhängig vom Bodenmaterial mit Bohrwerkzeugen, wie Schnecken oder Bohreimern (siehe Markierung Nr. 12 in Abbildung 7-3). Zur Unterstützung werden Hilfsgeräte, wie Bohrröhre bzw. Verrohrung zur Stützung der Bohrlochwandung (siehe Markierung Nr. 13 in Abbildung 7-3), Trichter und Rohre zur Führung des Betons im Bohrloch, zusammengebaut als Schüttrohr bezeichnet, oder eine Verrohrungsanlage zur Erhöhung des Drehmoments, eingesetzt.

Die drei Leistungskennwerte bei der Pfahlherstellung bzw. -produktion sind (1) die pro Tag produzierte Pfahllänge (vereinfacht Pfähle pro Tag), (2) Abweichungen zwischen geplanter und tatsächlicher Leistung (Prozessqualität) und (3) die Neigung der Pfähle (Produktqualität) [Fis-2021d; Nüb-2015]. Das Produktionssystem ähnelt einer Linienproduktion. Sie ist durch den Einsatz hochspezialisierter Ausrüstung und qualifizierter Geräteführenden gekennzeichnet. Um die Komplexität des Produktionssystems zu beherrschen, ist ein umfassendes Fachwissen in den Bereichen Geotechnik und Verfahrenstechnik erforderlich. Auf Grundlage der Leistungs- und Zielkennwerte wird die Anzahl der Geräte und des Zubehörs bestimmt.

Zur Aufnahme des Prozesses wurde die Baustelle besucht. Zum einen wurden die Bewegungen des Bohrgeräts und damit die Produktion erfasst. Die Ergebnisse sind in Flussdiagrammen in den Abbildungen C-1 bis C-3 in Anhang C dargestellt. Zum anderen wurde der gesamte Produktionsprozess erfasst, um die logistischen Abhängigkeiten herauszufinden. Es wurden keine Kennzahlen in der Wertstromanalyse aufgenommen. Stattdessen wurden diese Kennzahlen später durch die vorliegenden Terminpläne und Bohrprotokolle ergänzt. Die Ergebnisse wurden mit Expert*innen validiert. Dazu wurden verschiedene Interviews mit Beteiligten aus den verschiedenen Bauphasen durchgeführt, d. h. Kalkulation, Einkauf, MTA, Bauleitung und Geräteführenden, um die Details und Herausforderungen beim vorliegenden Anwendungsbeispiel besser zu verstehen. Zusätzlich wurden auch Expert*innen von zwei weiteren Spezialtiefbauunternehmen befragt, um den Prozess der Pfahlproduktion zu generalisieren. Die qualitativen Aussagen können mit einschlägiger Fachliteratur belegt werden.

Die Herstellung von Pfählen nach dem Kellybohrverfahren besteht im Wesentlichen aus drei Teilprozessen: (1) Bohren, (2) Bewehren und (3) Betonieren (siehe Abbildung 7-4). Die Ver- und Entsorgung dieser Produktionsschritte erfolgt mit Hilfe von Hilfsgeräten, wie dem Radlader oder Hydraulikbagger. Die Ergebnisse der Wertstromanalyse in Abbildung 7-4 beruhen auf Befragungen, die in der Bachelorarbeit von Grimm [fml-2020k], betreut durch die Autorin, durchgeführt und veröffentlicht wurden [Fis-2021d].

Sobald das Bohrgerät und alle benötigten Hilfsmittel, wie Bohrwerkzeuge (siehe Markierung Nr. 11 und 12 in Abbildung 7-3), Verrohrung (Markierung Nr. 13) und weitere Hilfsgeräte aufgestellt sind, beginnen die iterativen Schritte für den Teilprozess des Bohrens. Dazu schwenkt und positioniert sich das Bohrgerät zum Bohransatzpunkt. Das Bohrwerkzeug wird mit Hilfe der teleskopischen Kellystange (Markierung Nr. 9) abgesenkt. Durch Drehen des Kraftdrehkopfes (KDK; Markierung Nr. 10) wird das Drehmoment auf die verriegelte Kellystange übertragen und der Boden gelöst. Das gefüllte Werkzeug wird gezogen und entleert. Das Bohrgut wird vom THM, z. B. dem Radlader mit Containerbox, aufgenommen und zur Sammelstelle auf der Baustelle gebracht. Von der Sammelstelle aus erfolgt ein Abtransport zum Wertstoffhof.

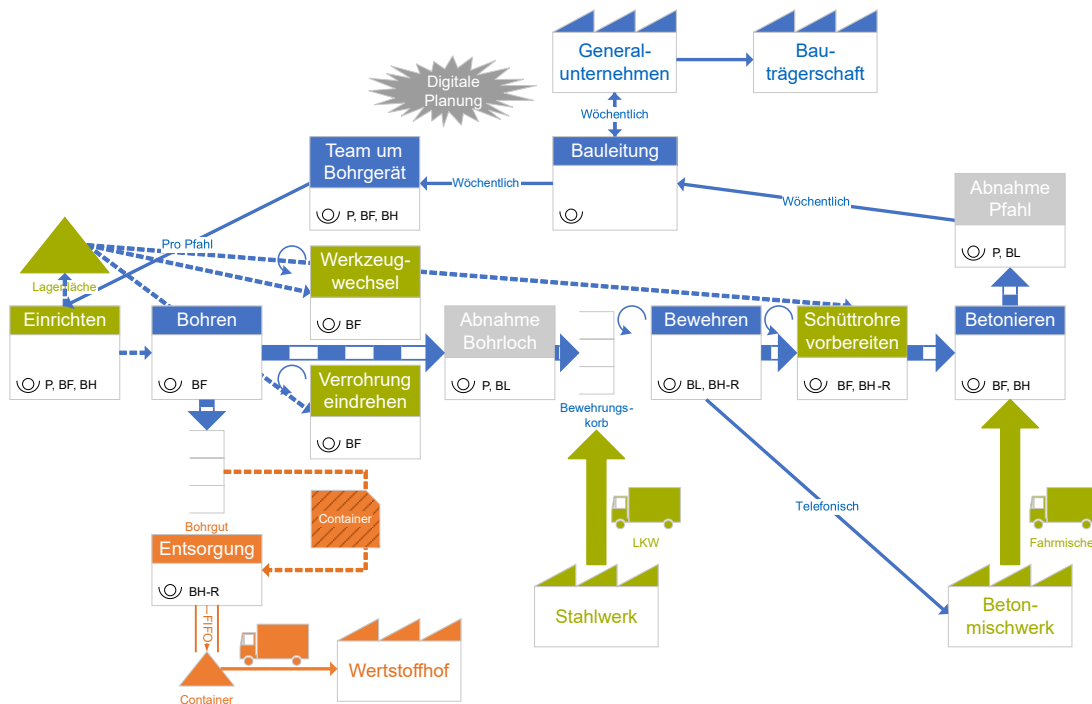


Abbildung 7-4: Wertstromanalyse für das Kellybohrverfahren (blau: Produktion; grau: Qualitätskontrolle; grün: Versorgung; orange: Entsorgung; Abkürzung zu BL: Bauleitung; P: Polier*in; BH: Bohrhelfer*in; BF: Bohrgeräteführer*in; BH-R: Bohrhelfer*in mit Radlader; eigene Darstellung nach [Fis-2021d].

Abhängig von der Bodenart und Höhe des Grundwassers muss die Bohrlochwandung durch eine Verrohrung gestützt werden [DIN-1536]. Die Verrohrung eilt i. d. R. dem Werkzeug voraus, um einen Grundbruch zu verhindern. Die Verrohrung muss somit im Wechselspiel zum Lösen des Bodens stattfinden. Die Verrohrung wird über einen speziellen selbstverschließenden Mechanismus vom Kraftdrehkopf aufgenommen. Das Bohrwerkzeug kann dabei an der Kellystange verbleiben. Die Verrohrungsstücke werden manuell von den Bohrhelfenden mit Bolzen verbunden. Das erste Rohr ist mit Stollen versehen, auch Bohrschuh genannt (siehe Markierung Nr. 4 in Abbildung 7-3), um ein besseres Vorankommen im Boden zu ermöglichen.

Je tiefer das Bohrwerkzeug, desto geringer ist die Leistung aufgrund längerer Ein- und Ausfahrzeiten und höherer Oberflächenreibung. Ist die gewünschte Bohrlochtiefe erreicht, wird die Sohle gereinigt und ein Bewehrungskorb eingesetzt. Aufgrund der vorliegenden geologischen Besonderheiten wird zusätzlich ein Kiespolster zur Beschwerung der Bohrsohle eingebaut. Der Einsatz des Bewehrungskorbs kann über das Hilfsseil des Bohrgeräts erfolgen. Dazu wird der Korb am Hilfsseil befestigt und ggf. zusammen mit einem THM angehoben und aufgestellt. Der aufgestellte Bewehrungskorb wird mit Hilfe des Bohrgeräts in die Bohroffnung abgesenkt. Die Länge der Bewehrungskörbe ist abhängig von der zulässigen Transportlänge und kann bis zu 20 m lang sein. Werden längere Bewehrungskörbe benötigt,

werden die Bewehrungskörbe gestoßen, d. h. die eingelassenen Bewehrungskörbe werden am Bohransatzpunkt gehalten, mit Hilfe von Bolzen manuell miteinander verbunden und weiter abgelassen.

Für die Betonage des Bohrpfahls wird das Schüttrohr in das Bohrloch eingebracht. Die Länge des Schüttrohrs, definiert durch die Anzahl der zusammengebauten Rohre, ist abhängig von der zulässigen Fallhöhe des Betons bzw. der geforderten Einbauqualität. Der Beton kann direkt über den Auslass des Fahrmischers oder eine Betonpumpe bzw. einen Betonkübel eingebracht werden, was zusätzliche Teilschritte erfordert. Die Rohre der Verrohrung und des Schüttrohrs werden abwechselnd entfernt. Durch die zusätzlichen Betondrücke muss das Bohrgerät eine erhöhte Leistung aufbringen, wobei eine Verrohrungsanlage unterstützen kann.

7.2.4 Einflussgrößen

Die Einflussgrößen auf das vorliegende Produktionssystem gehen aus der Wertstromanalyse hervor. Ergänzend wurden systematische Interviews mit Expert*innen von drei Bauunternehmen aus dem Spezialtiefbau durchgeführt [Fis-2021d; fml-2020k]. Insgesamt können sieben Einflussfaktoren beim Kellybohrverfahren identifiziert werden:

1. **Vertragsbedingungen:** Eine frühzeitige Einbeziehung der Spezialtiefbauunternehmen in der Entwurfsphase kann sich positiv auf das Bauprojekt auswirken, z. B. wirkt sich die Anpassung der Pfahlgeometrie auf die Versorgungslogistik oder Produktion von Bewehrung und Beton durch zusätzliche Bewehrungsstöße oder Minderbeton aus.
2. **Umwelteinflüsse:** Schlechte Wetterbedingungen können zu einer Leistungsminde- rung von 50 % bis 70 % von Geräten (Stabilität auf dem Untergrund) und Mensch (Sichtverhältnisse) führen [Gir-2010; Hof-2002].
3. **Baustellenorganisation:** Der Einfluss der Baustellenorganisation bezieht sich auf die Arbeitsorganisation und -umfang sowie Unterbrechungen, Wartung und Instandhal- tung [Hof-2002]. Im Spezialtiefbau sind Geräteauslastungen von ca. 80 % üblich, so genannte 50-Minuten-Stunden [Bau-2007; Kön-2014].
4. **Geologie:** Die Bodenschichten erschließen sich aus einzelnen Probebohrungen, so- genannte Aufschlussbohrungen, mit einem Durchmesser von bis zu 80 mm nach DIN EN ISO 22475-1 [DIN-22475-1]. Sie geben nur eingeschränkte Vorhersagen über das beim Bohren anzutreffende Material. Gesteinsbrocken, auch Findlinge genannt, führen zu Inhomogenitäten und stören den Bauprozess bis hin zum völligen Stillstand. Auch das Grundwasser spielt eine Rolle. Der optimale Füllgrad und die Auswahl des Geräts hängen von der Bodenbeschaffenheit ab. Die theoretische Produktivitätsrate berechnet sich aus dem Auflockerungs- und Füllgrad des Bodens im Werkzeug nach DIN ISO 9245 [DIN-9245].

5. **Qualifikation:** Ein Bohrgerät ist ein hochspezialisiertes Gerät, ähnlich einer Anlage. Aus den Gesprächen und einschlägiger Literatur [Gir-2010] gehen Leistungssteigerungen abhängig vom Personal von 20 % bis 35 % hervor. Entscheidend ist nicht die Bedienung des Geräts (oder vorhandener Assistenzsysteme), sondern das Prozessverständnis. Neben den Geräteführenden, ist die Leistung des gesamten Teams, was einem Bohrgerät zugeordnet wird, entscheidend. Aus den Interviews geht hervor, dass es etwa eine Woche benötigt, um ein Team zu bilden.
6. **Ausführungsart:** Unterschiede in der Produktionsleistung ergeben sich durch die Gestaltung des Arbeitszyklus. Bei Erdarbeiten kann eine gezielte und damit aufwendigere Beladung des LKWs durch den Hydraulikbagger zu einer Reduzierung der Produktionsleistung um bis zu 10 % führen [Bau-2007]. Bei Straßenarbeiten kann das Arbeiten in Bahnen bei Planiertraupen die Effizienz um bis zu 20 % erhöhen [Gir-2010]. Bei Bohrgeräten spielt der Abstand zwischen den Bohrlöchern eine Rolle, da mit größerem Abstand der Anteil der Bohrleistung an der Gesamtleistung sinkt. Logistische Einflüsse nehmen gleichzeitig zu.
7. **Abnutzung und Instandhaltung:** Bei Bohrgeräten muss der Verschleiß des Werkzeugs, z. B. der Stollen am Bohrwerkzeug, berücksichtigt werden. Insbesondere die Verrohrungsschuhe haben einen erheblichen Einfluss auf die Leistung, da sie bis zur Betonage im Boden verbleiben. Ein vorzeitiger Abrieb verzögert das Erreichen der erforderlichen Bohrtiefe. Im vorliegenden Projekt liegt ein Seeton vor, der so weich ist, dass der Abrieb nicht signifikant ist. Die Ausfallwahrscheinlichkeit von Baugeräten im Langzeitbetrieb hängt von den Betriebsstunden ab [Gir-2010]. Vorbeugende Wartungsintervalle verringern die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls.

Fazit der Untersuchung zu den Einflussfaktoren ist, dass trotz des vermeintlich geräteintensiven Prozesses der Faktor Mensch eine entscheidende Rolle für einen kontinuierlichen Produktionsfluss spielt. Eine reine Optimierung der Geräte, z. B. durch Assistenzsysteme bis hin zur Autonomie, ist nicht zielführend. Vielmehr muss ermöglicht werden, dass das Verständnis des Prozesses dem Menschen zugänglich gemacht wird (siehe Kaizen-Blitz „Digitale Planung“ in Abbildung 7-4).

7.2.5 Eingangsdaten

Tabelle 7-1 klassifiziert die Eingangsdaten für das Spezialtiefbauprojekt, um dessen Baufortschritt zu simulieren.

Alle Informationen stammen aus dem Terminplan und den Bohrprotokollen. Der Terminplan mit den Soll-Daten entspricht dem Stand vom 24.07.2019. Die Ist-Daten gehen aus dem Bohrprotokoll hervor. Aufgrund der geologischen Besonderheiten werden bei der Herstellung verschiedene Qualitätskriterien zur Vermeidung von Grundbruch beachtet und für jeden Pfahl im Bohrprotokoll dokumentiert.

Tabelle 7-1: Eingangsdaten für das Spezialtiefbauprojekt (eigene Darstellung)

Baustellenspezifisch (Produkt)	Baufaufgabenspezifisch (Prozess)	Unternehmensspezifisch (Ressource)	Bautechnologisch (Methode)
- Anzahl Bohrpfähle (aufgeteilt in Achsen) - Layout der Baustelle: Positionen von Baustellenzufuhr, Materiallager und Wertstoffhof - Pfahl- und Bohrtiefe	- Zeitraum des Projekts, Start- und Endzeit Pfahl - Reihenfolge der Pfähle - Materialbedarf je Tätigkeit (Bewehrung, Beton) - Hilfsmittel je Tätigkeit (Werkzeug, Verrohrung, Verrohrungsanlage) - Aufwandswerte je Tätigkeit (Anzahl Personal und zeitlicher Aufwand) - TE je Material (Schaufelvolumen, Trommelinhalt von Fahrmischern)	- Arbeitszeiten (Arbeits- und Pausenzeiten) - Anzahl und Art an Bohrgeräten (BG39, BG46) - Anzahl und Art von THMs (Hydraulikbagger, Radlader) - Wartezeit Fahrmischer	- Kellybohrverfahren - Verrohrtes Bohren - Wasserauflast (vernachlässigt)

Insgesamt leiten sich für die Simulation die Bearbeitungszeiten für sieben Teilprozesse ab: (1) Lösen, (2) Leerlauf zwischen Lösen und Bewehren, (3) Bewehren, (4) Leerlauf zwischen Bewehren und Einbringen des Schüttrohrs, (5) Einbringen des Schüttrohrs, (6) Leerlauf zwischen Einbringen des Schüttrohrs und Betonieren und (7) Betonieren.

Für die aufbereiteten Bearbeitungszeiten in Abhängigkeit der Bohrtiefe werden für die sieben Teilprozesse jeweils eine lineare Regression abgeleitet. Die Bearbeitungszeiten pro Bohrpfahl in Abhängigkeit seiner Bohrtiefe für das Bohren und das Betonieren sind exemplarisch in Abbildung 7-5 dargestellt.

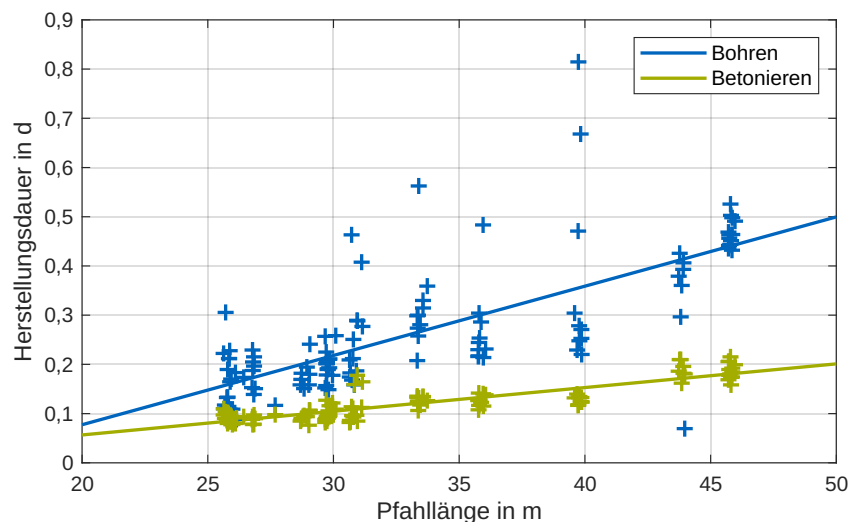


Abbildung 7-5: Dauer der Teilprozesse Bohren (blau) und Betonieren (grün) inkl. lineare Regression (durchgezogene Linien) für die Bohrpfähle des Spezialtiefbauprojekts in Abhängigkeit ihrer Länge (eigene Darstellung nach [Fis-2023a])

Die Bearbeitungszeiten beziehen sich rein auf die Dauer der Bearbeitung, nicht auf Schicht-, Wochen- oder Feiertage. Für die Ableitung der linearen Regression wird eine Normalverteilung angenommen.

7.3 Implementierung

7.3.1 Überblick

Abbildung 7-6 zeigt das methodische Vorgehen für den Baustein der Datennutzung zur Implementierung eines Petri-Netzes zur Baufortschrittsvorhersage mit Hilfe der Simulation. Es wird die implementierte Simulationsarchitektur, -layout und -logik vorgestellt. Anschließend erfolgt die Verifikation und Validierung der Simulation.

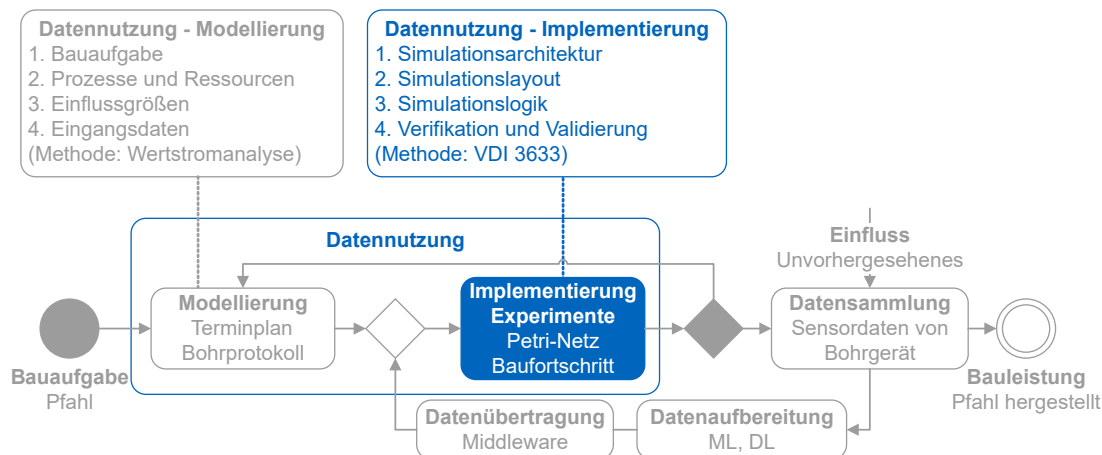


Abbildung 7-6: Baustein für die Implementierung des Digitalen Zwillings im Spezialtiefbau (blau; eigene Darstellung)

7.3.2 Simulationsarchitektur

Da der Fokus in diesem Anwendungsbeispiel nicht auf dem Baustein der Datennutzung liegt, wird eine einfache Simulationsarchitektur gewählt. Sie basiert auf den Vorarbeiten von Kargul et al. [Kar-2015] (siehe Abschnitt 3.2.3). Die Umsetzung erfolgt zunächst in Tecnomatix Plant Simulation Version 15.1 [Fis-2020; Fis-2023b]. Später wird die Implementierung in Python Version 3.10.8 vorgezogen, um Schnittstellen zu den in Python implementierten ML-Modellen zu umgehen [Fis-2023a].

7.3.3 Simulationslayout

Für die Baufortschrittsvorhersage werden lediglich die aufeinanderfolgenden Teilprozesse modelliert, die aus den Bohrprotokollen abgeleitet werden können (siehe Abschnitt 7.2.5): (1) Bohren, (2) Leerlauf zwischen Bohren und Bewehren, (3) Bewehren, (4) Leerlauf zwischen Bewehren und Einbringen des Schüttrohrs, (5) Einbringen des Schüttrohrs, (6) Leerlauf zwischen Einbringen des Schüttrohrs und Betonieren und (7) Betonieren. In der grafischen Umsetzung entspricht das Simulationslayout der Abbildung 7-7.



Abbildung 7-7: Teilprozesse des betrachteten Kellybohrverfahrens (blau: Produktion; grün: Versorgung) (eigene Darstellung nach [Fis-2023a])

7.3.4 Simulationslogik

Die implementierte Simulationslogik in der Simulationssoftware Plant Simulation entspricht der Logik eines Petri-Netzes (siehe Abschnitt 3.1.2). Eine Bearbeitungsstation entspricht einem Teilprozess in Abbildung 7-7. Ein Token „durchläuft“ die einzelnen Stationen und löst durch den Wechsel von einer Station auf die nächste Station eine Zustandsänderung aus. Bei jeder Zustandsänderung erhöht sich die Gesamtzeit entsprechend um die Bearbeitungszeit der vom Token ausgetretenen Station. Im Gegensatz dazu basiert die Implementierung in Python auf einer Zeitsteuerung ohne Token. Beide Logiken führen letztlich zum gleichen Ergebnis.

Für jeden der sieben Teilprozesse aus dem Bohrprotokoll wird eine Bearbeitungszeit aus der vorgegebenen Wahrscheinlichkeitsverteilung ausgewählt. Die Gesamtzeit ergibt sich durch die Addition der einzelnen Bearbeitungszeiten. Indem die Simulation mehrmals durchgeführt wird, im Sinne einer Monte-Carlo Simulation, hier insgesamt 10.000 mal, kann sichergestellt werden, dass die Anzahl der zufällig gezogenen Bearbeitungszeiten die vorgegebene Wahrscheinlichkeitsverteilung in ausreichender Form repräsentiert. Die Ergebnisse werden dann kumuliert dargestellt.

7.3.5 Verifikation und Validierung

Die Verifikation der Implementierung der Simulationslogik erfolgt durch die Eingabe konstanter Eingangsdaten, wodurch eine einfache Rückrechnung der Ergebnisse möglich ist. Des Weiteren werden die zufällig ausgewählten Eingangsdaten von den Wahrscheinlichkeitsverteilungen überprüft. Die Ergebnisse werden in Summe als Histogramm ausgegeben. Das Histogramm spiegelt die vorgegebene Normalverteilung wider und damit die vorgegebene Implementierung. Die Ergebnisse werden anschließend mit dem Industriepartner validiert.

Eine detaillierte Untersuchung bauleistungslogistischer Fragestellungen kann mit der implementierten Simulation nicht abgedeckt werden. Das Petri-Netz bildet keine Materialflüsse oder Ressourcen ab. Teilprozesse zum Leerlauf, Bewehren oder Betonieren lassen nur eingeschränkt Rückschlüsse auf die Bauleistungslogistik zu, sind allerdings zu wenig detailliert. Simulationsexperimente beschränken sich auf die Variation der Eingangsdaten, was unter den gegebenen Fragestellungen der nachfolgenden Bausteine für die Datensammlung, -aufbereitung und -übertragung auch im Vordergrund steht.

7.4 Datensammlung

Abbildung 7-8 zeigt das methodische Vorgehen für den Baustein der Datensammlung.

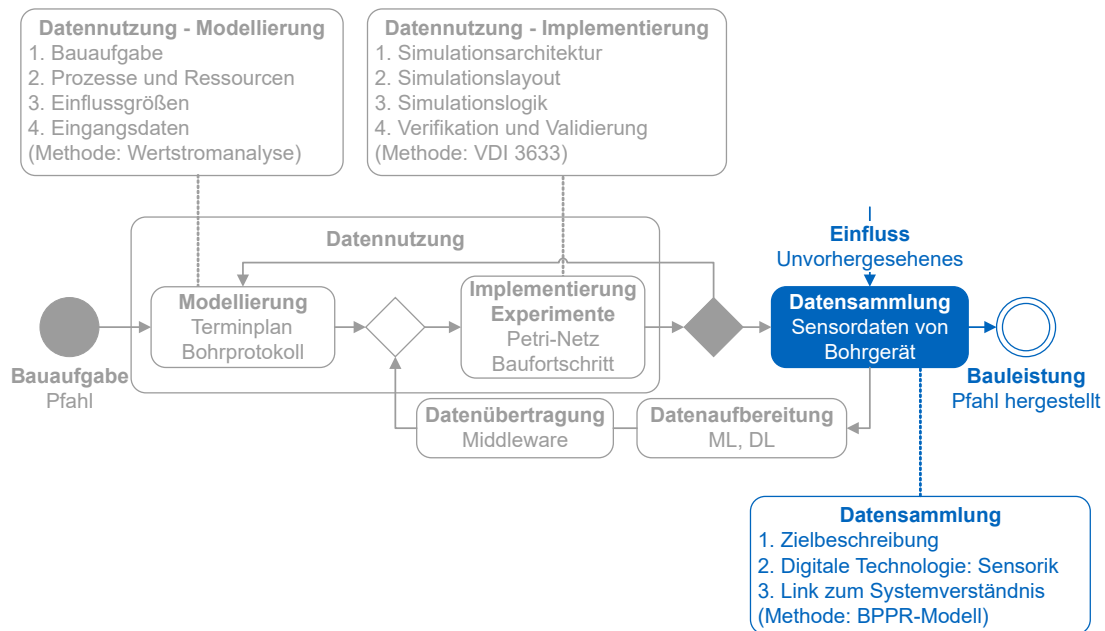


Abbildung 7-8: Baustein für die Datensammlung am Digitalen Zwilling im Spezialtiefbau (blau; eigene Darstellung)

Für die Übertragung von Daten während des Produktionsprozesses in die Simulation werden Daten direkt von den Bohrgeräten verwendet. Anders als bei den Arbeiten aus der Literatur (siehe Tabelle 3-4) müssen dazu keine weiteren Sensoren installiert werden. Fehlerquellen aus dem Versuchsaufbau, wie in Abschnitt 5.4, werden vermieden. Das ausführende Personal wird in seiner wertschöpfenden Tätigkeit nicht gestört.

Im vorliegenden Fall liegen Sensor- und Aktivitätsdaten von insgesamt 16 Tagen mit 370.174 Datenpunkten vor, was 102 h entspricht (siehe Tabelle C-1 in Anhang C).

Über eine proprietäre Plattform des Geräteherstellers stehen die folgenden Daten zur Verfügung:

- **Sensordaten:** Die Sensordaten stellen die Merkmale dar, die klassifiziert werden sollen, um Informationen aus den Daten zu generieren. Für das vorliegende Anwendungsbeispiel werden Informationen über die Bearbeitungszeit einzelner Vorgänge benötigt. Sie dienen als Eingangsgröße für die Simulation.

Es wurden alle Sensoren, die im Bohrgerät bereits verbaut waren, zur Datensammlung genutzt (schwarz ausgefüllte Markierungen in Abbildung 7-3). Gemessen werden 20 Sensorwerte (siehe Tabelle 7-2). Sie werden mit einer Frequenz von 1 Hz an das Telematikmodul gesendet. Die Daten können in der Plattform des Herstellers eingesehen und exportiert werden.

Für die Datenübertragung wird zum Zeitpunkt der durchgeführten Versuche das Telematikmodul TC3G von Sensor-Technik Wiedemann GmbH [Sen-2018] genutzt. Das verbaute Telematikmodul sendet die Daten vom Bohrgerät zur proprietären Plattform des Geräteherstellers. Die Übertragung kann über drei Arten erfolgen: (1) Nach Ereignissen, z. B. nach Beendigung eines Bohrpfahls, (2) nach Überschreitung eines bestimmten Datenvolumens oder (3) in einem bestimmten Zeitintervall von bis zu 15 min.

Tabelle 7-2: *Sensordaten des Bohrgeräts (hervorgehoben: ausgewählte Merkmale; eigene Darstellung nach [Fis-2021b])*

Nr.	Sensor	Einheit	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standard-abwei-chung	Varianz
1	Tiefe des Werkzeugs	m	0,00	42,51	9,63	10,28	105,60
2	Seilgeschwindigkeit der Hauptwinde	cm/min	0,00	62,32	11,81	15,79	249,35
3	Drehmoment des KDKs	kN m	0,00	390,00	64,17	110,45	12.199,22
4	Druck Pumpe 1	bar	0,00	355,40	88,87	118,72	14.095,24
5	Druck Pumpe 2	bar	0,00	361,20	102,29	117,10	13.713,18
6	Druck Pumpe 3	bar	0,00	343,60	64,24	63,87	4078,96
7	Druck Pumpe 4	bar	0,00	304,80	29,84	47,57	2262,84
8	Drehzahl des KDKs	U/min	0,00	48,20	6,30	10,59	112,15
9	Drehmoment der Kellystange	%	0,00	100,00	16,24	29,23	854,35
10	Seilkraft der Hauptwinde	t	0,56	32,30	13,25	4,31	18,61
11	Seilkraft der Hilfswinde	t	0,00	13,70	0,01	0,25	0,07
12	Vortriebskraft	t	-37,20	31,40	0,66	7,79	60,63
13	Vortriebstiefe	m	0,00	0,51	0,00	0,02	0,00
14	Länge Verrohrung	m	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15	Höhe Bohrkante	m	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16	Status Bohrgerät	–	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17	Drehmomentenstufen	–	1,00	3,00	2,79	0,58	0,34
18	Getriebemodus der Hauptwinde	–	0,00	2,00	1,34	0,84	0,70
19	Neigung X	°	-3,64	2,20	-0,1	0,46	0,21
20	Neigung Y	°	-3,90	6,44	-0,01	0,66	0,43

- **Aktivitätsdaten:** Die Aktivitätsdaten werden für die Klassifizierung der Sensordaten benötigt. Sie sind die Zielwerte für das spätere Training der ML-Modelle.

Während der Herstellung des Pfahls werden manuell die Tätigkeiten bzw. Aktivitäten auf der Baustelle mit einer Software des Bauunternehmens [BAU-2024a] digital mit Zeitstempel dokumentiert. Diese Dokumentation sowie eine erste analytische Auswertung wird von Wackerl [Wac-2020] im Rahmen ihrer Bachelorarbeit durchgeführt und dient als Grundlage für diese Arbeit. Es stehen 27 vordefinierte Aktivitäten zur Verfügung (siehe Tabelle C-1 in Anhang C). Bei der Auswahl werden sie mit einem Zeitstempel und der Identifikationsnummer des Bohrgeräts versehen. Über eine WLAN-Verbindung mit dem

Bohrgerät werden die Daten an das verbaute Telematikmodul und von dort zur Plattform gesendet. Die Aktivitätsdaten können auf der Plattform eingesehen und exportiert werden. Insgesamt stehen Aktivitätsdaten von 16 Arbeitstagen zur Verfügung.

- **ISO 15143-3 Daten:** Diese Daten beziehen sich auf die in der ISO-Norm 15143-3 [ISO-15143-3] definierten Werte zur Beschreibung des Zustands eines Geräts in einer Flotte, wie z. B. Identifikation, letzte bekannte Position oder Betriebsstunden, sowie deren Austausch mit Dritten. Eine API nach ISO-Norm 15143-3 wird in der Plattform des Herstellers zur Verfügung gestellt.

Die bereitgestellten Daten können im BPPR-Modell mit dem Systemverständnis kombiniert werden, um deren Möglichkeiten und Anforderungen darzustellen (siehe Abbildung 7-9).

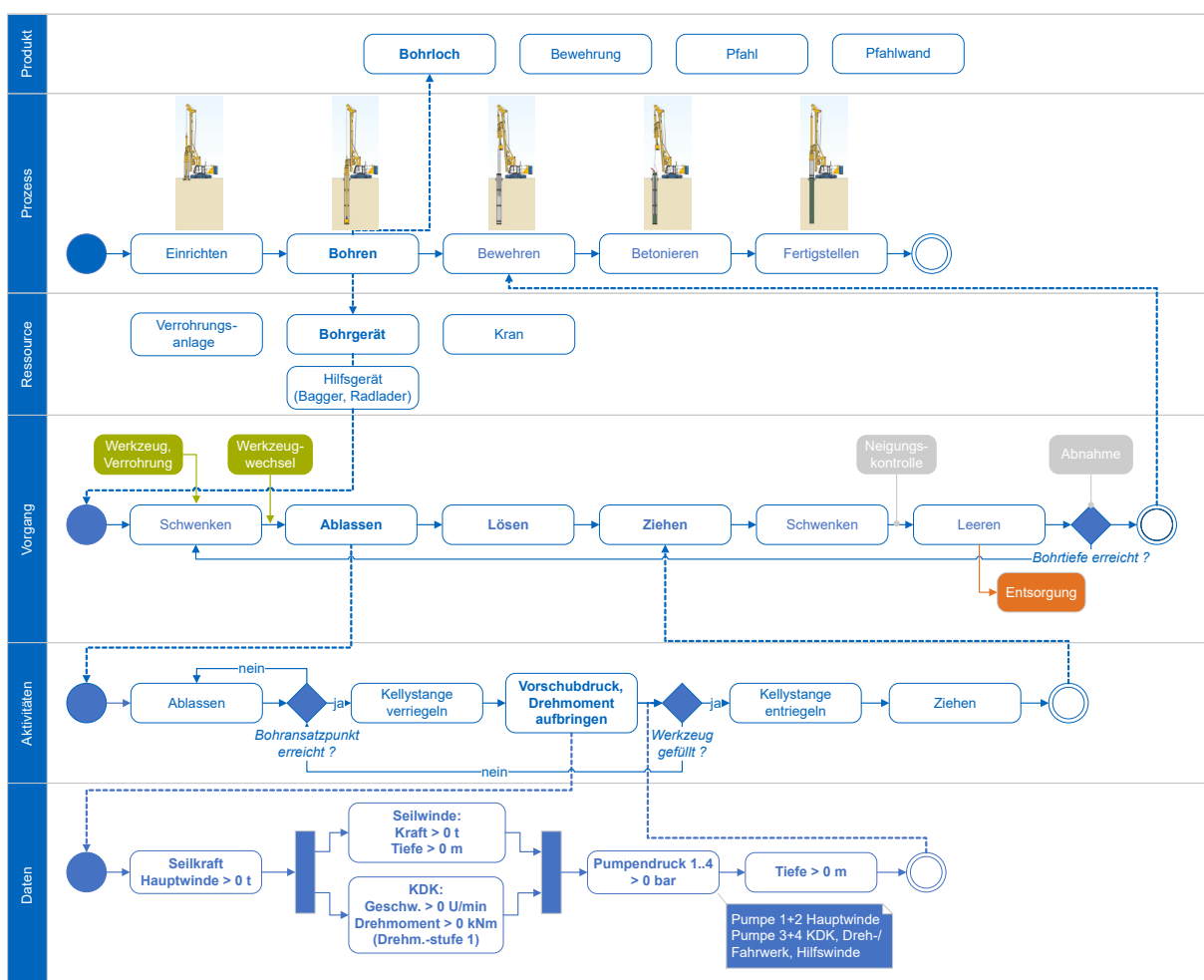


Abbildung 7-9: BPPR-Modell mit Fokus auf dem Teilprozess des Bohrens (grün: Versorgung; orange: Entsorgung; grau: Qualitätskontrolle; eigene Darstellung nach [Fis-2023a]; Bildrechte: Bauer AG [BAU-2023])

Beispielhaft wird das Bohren (Prozess) zur Herstellung eines Bohrlochs (Produkt) betrachtet. Dazu wird ein Bohrgerät inkl. Team und Hilfsgeräten (Ressourcen) verwendet. Zwischen den einzelnen Produktionsschritten wird die logistische Unterstützung ersichtlich, z. B. durch die Bereitstellung von Verrohrungen oder Werkzeugen. Durch die Verwendung von intern

verbauten Sensoren des Bohrgeräts sind diese Schnittstellen nicht abgedeckt. Teil des Bohrens sind die aufeinanderfolgenden Vorgänge des Ablassens des Werkzeugs, Lösen des Bodens am Bohransatzpunkt und anschließendem Ziehen des vollen Werkzeugs. Jede der drei Vorgänge wird aus Sicht des Geräteführenden wiederum in Aktivitäten unterteilt. Diese Aktivitäten entsprechen den Bewegungen des Geräts, die wiederum durch verschiedene Sensoren an den Bauteilen des Geräts gemessen werden können, z. B. die Seilkraft der Hauptwinde oder deren Tiefe. Die Unterscheidung in Aktivitäten und Daten macht deutlich, welche Bewegungen bereits von den intern verbauten Sensoren erfasst werden können.

Nicht direkt erfasst werden z. B. die Aktivitäten für den Vorgang des Schwenkens, da keine Daten zur relativen Drehung zwischen Unter- und Oberwagen aufgezeichnet werden. Ebenfalls deutlich wird, dass die Datensammlung bisher nicht in den Bauprozess integriert wird bzw. die Aktivitätsdaten manuell durch eine zusätzliche Person erfasst werden. Für die Integration des Digitalen Zwillings in den Bauprozess müssen diese Schritte ergänzt werden.

Für die nachfolgenden Untersuchungen in den Abschnitten 7.5.2 und 7.5.3 wird der eigentliche Vorgang des Bohrens mit den folgenden fünf Aktivitäten betrachtet: (1) Leeren, (2) Ablassen, (3) Lösen, (4) Ziehen und (5) Verrohrung eindrehen.

In der abschließenden Untersuchung in Abschnitt 7.5.3 werden alle Aktivitäten verwendet (siehe Tabelle C-1 in Anhang C).

7.5 Datenaufbereitung

7.5.1 Überblick

Aus den gesammelten Sensordaten gingen die erforderlichen Eingangsdaten für die Simulation nicht direkt hervor. Bei den vorherigen Anwendungsbeispielen aus dem Hoch- und Modulbau ergaben sich die Eingangsdaten für die Simulation (Liefer- bzw. Bearbeitungszeiten) direkt aus den verwendeten digitalen Technologien zur Datensammlung. Die Sensordaten in ihrer Rohform lassen keine Rückschlüsse auf den Bauprozess zu.

Aufbauend auf der Datensammlung werden im Folgenden drei aufeinander aufbauende KI-basierte Ansätze zur Datenaufbereitung der Sensordaten im Sinne der Aktivitätserkennung aufgezeigt (siehe Abbildung 7-10):

1. Vergleich verschiedener ML-Modelle [Fis-2021b; fml-2020i; fml-2020j; fml-2020m],
2. Vergleich zeitabhängiger DL-Modelle [Fis-2021c; fml-2021f] und
3. Untersuchungen zur Sensitivität gegenüber der gesammelten Aktivitätsdaten (hierarchische Klassifizierung) [Fis-2023a; fml-2021f].

Durch die Verwendung der Aktivitätsdaten als Zielwerte zählen die Ansätze zum überwachten ML (siehe Abschnitt 2.2.3).

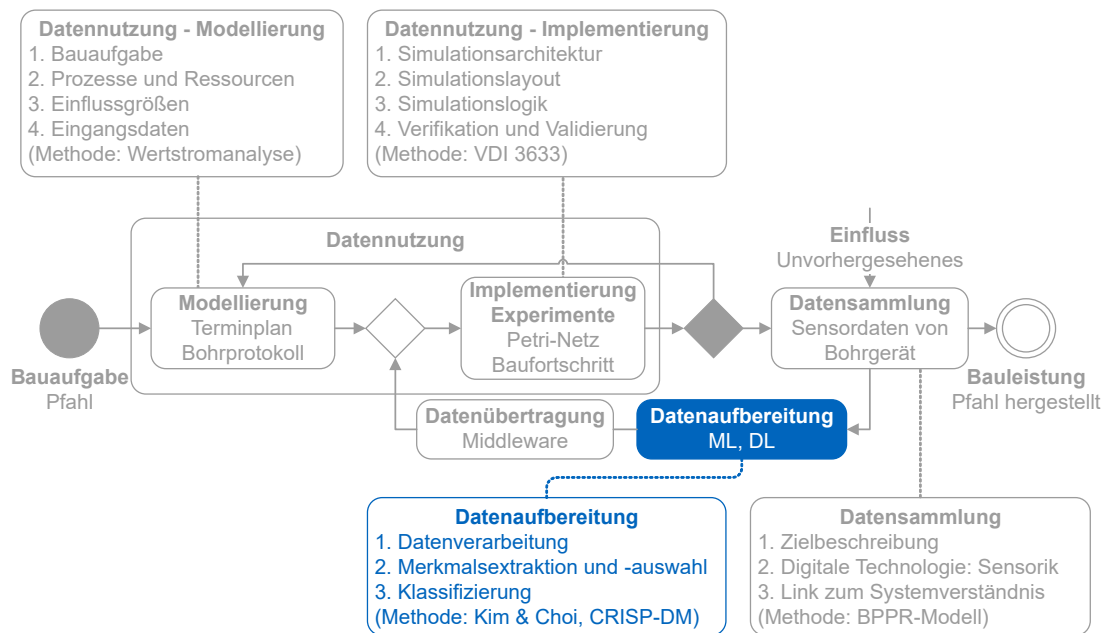


Abbildung 7-10: Baustein für die Datenaufbereitung am Digitalen Zwilling im Spezialtiefbau (blau; eigene Darstellung)

Als Programmiersprache wird Python 3 und 3.8 gewählt. Die Programmiersprache bietet verschiedene Bibliotheken. Für diese Arbeiten werden insbesondere die Bibliotheken Scikit-Learn zur Nutzung von vorimplementierten ML-Modellen, Pandas zur Visualisierung und NumPy zur Verarbeitung von Vektoren und Matrizenrechnung für die Datenvorverarbeitung genutzt. Für die DL-Modelle wird die Bibliothek von Keras bzw. tensorflow verwendet. Die Implementierung erfolgt in den Entwicklungsumgebungen JupyterLab (internetbasiert), Jupyter Notebooks (unter Zuhilfenahme der Distribution Anaconda) bzw. Microsoft Visual Studio.

7.5.2 Aktivitätserkennung mit Hilfe von Maschinellem Lernen

Vorgehensweise

Dieser Abschnitt basiert auf den Studienarbeiten von Liang [fml-2020i], Orschlet [fml-2020j] und Bi [fml-2020m]. Die Arbeiten wurden bereits gemeinsam mit der Autorin in [Fis-2021b] veröffentlicht.

Die Datenaufbereitung für den Vergleich verschiedener ML-Modelle erfolgt nach der herkömmlichen Vorgehensweise, wie von Kim und Choi [Kim-2019] beschrieben. Zunächst werden die Daten mit Hilfe von Sensoren erfasst (Datensammlung (engl. Data Acquisition)) (siehe Abschnitt 7.4). Die erfassten Daten werden auf Ausreißer und Rauschen hin bereinigt (Datenverarbeitung (engl. Signal Processing)). Einzelne Merkmale (engl. Feature) werden

extrahiert (Merkmalsextraktion (engl. Feature Extraction)) und ausgewählt (Merkmalsauswahl (engl. Feature Selection)). Dann erst erfolgt die Anwendung der Klassifikationsmodelle (Klassifizierung (engl. Classification)).

Datenverarbeitung

Die Datenverarbeitung erfolgt in vier Schritten:

1. Gegenüberstellung der Datensätze,
2. Unterdrückung von Rauschen,
3. Filtern von Ausreißern,
4. Standardisierung der Daten.

Die **Gegenüberstellung** der gesammelten Datensätze erfolgt anhand der Zeitstempel. Jeder Datenpunkt der Sensordaten benötigt einen Datenpunkt aus den Aktivitätsdaten. Die Sensordaten liegen als Zeitreihe vor, die Aktivitätsdaten als Ereignisse. Entsprechend werden die Zeitpunkte zwischen zwei Aktivitätsdaten mit den entsprechenden Aktivitäten ergänzt. Die anschließende Plausibilitätsprüfung ergibt, dass die Zeitmessungen auf dem Bohrgerät, auf dem die Sensordaten gesammelt werden und in der Software, in der die Aktivitätsdaten gesammelt werden, unterschiedlich sind. Sie werden manuell angepasst.

Die Übersicht über die Sensordaten in Tabelle 7-2 zeigt, dass die Sensordaten „Länge Verrohrung“, „Höhe Bohrkante“ und „Status Bohrgerät“ keine Informationen liefern und direkt ausgeschlossen werden können.

Die Sensordaten in ihrer Rohform enthalten ein **Rauschen**, was die Ergebnisse beeinflussen kann [Wan-1995]. Nach Zhu und Wu [Zhu-2004] kann dieses Rauschen auf implizite Fehler beim Messwerkzeug oder zufällige Bedienfehler zurückgeführt werden. Es gibt zahlreiche Methoden zur Rauschunterdrückung bzw. Glättung von eindimensionalen Zahlenreihen. Auf Basis der Untersuchungen von Köhler und Lorenz [Köh-2005] wird die Moving Average Methode ausgewählt. Dabei wird für jeden Datenpunkt ein gleitender Mittelwert aus den fünf benachbarten Werten der diskreten Zeitreihe gebildet, was insgesamt zu einer Glättung führt.

Im nächsten Schritt erfolgt das **Filtern von Ausreißern**. Ausreißer sind Messwerte, die nicht in einem festgelegten Streubereich um den Erwartungswert liegen. Üblicherweise erfolgt dieser Schritt vor der Glättung des Rauschens unter festgelegten Kriterien. Im vorliegenden Fall soll allerdings eine eindeutige Identifikation von Ausreißern gegenüber notwendigen Sensordaten sichergestellt werden.

Verdeutlicht werden kann diese Notwendigkeit am Beispiel der Sensordaten für die Tiefe des Werkzeugs. Wird der gesamte Datensatz betrachtet, zeigt sich eine rechtsschiefe Verteilung (siehe Abbildung 7-11a). Pfahllängen von mehr als 40 m werden kaum erreicht

(<1 % Wahrscheinlichkeit). Werden die Datenpunkte nur im Zeitraum der Aktivität „Lösen“ betrachtet, zeigt sich eine Normalverteilung zwischen 0 m und 40 m (siehe Abbildung 7-11b). Auch aus dem Prozessverständnis ergibt sich, dass das Lösen des Pfahls iterativ erfolgt. Das Werkzeug ist folglich am häufigsten in der Tiefe zwischen der minimalen und maximalen Pfahllänge. Die maximale Pfahllänge wird nur einmal erreicht. Die Definition als Ausreißer liegt somit aus Sicht der Datenpunkte nahe, nicht aber aus Sicht des Prozessverständnisses und würde somit zu falschen Ergebnissen bei den ML-Modellen führen.

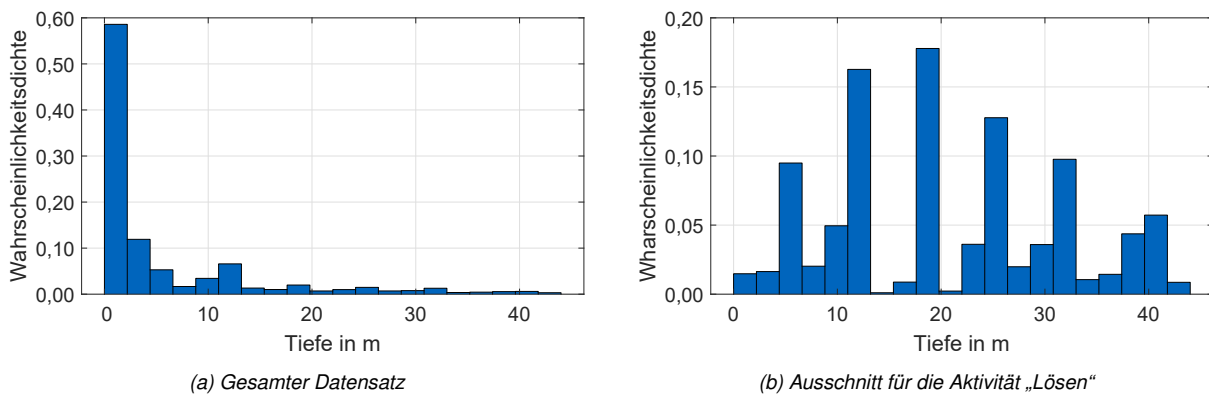


Abbildung 7-11: Histogramme für die Tiefe des Werkzeugs (eigene Darstellungen nach [fml-2021f])

Daher erfolgt das Filtern von Ausreißern manuell an den bereits geglätteten Daten. Dazu findet eine visuelle Überprüfung auf Ausreißer in den Daten für jede Aktivität mit Hilfe von Häufigkeitsverteilungen und dem Box-Plot-Verfahren statt. Bei erfolgreicher Überprüfung auf Prozessverständnis, werden Werte von Sensordaten außerhalb des unteren und oberen Whiskers, hier des 1,5-fachen Quartilsabstands [Mül-2011], aussortiert.

Im letzten Schritt werden die Daten **standardisiert**. Bei unterschiedlichen Merkmalen liegen teils große Unterschiede in Größenordnung und Einheit vor. Insbesondere bei ML-Modellen, die die Abstände von Datenpunkten untersuchen, z. B. bei kNN oder SVM, können diese Unterschiede zu ungenauen Ergebnissen führen. Die Daten werden mit Hilfe der Standardscaler-Funktion innerhalb der Scikit-Bibliothek in Python skaliert, um Abhängigkeiten von Einheiten auszuschließen.

Tabelle 7-3 zeigt die Anzahl der Datenpunkte nach der Gegenüberstellung mit den Sensordaten. Die Aktivität „Verrohrung eindrehen“ hat mit 42.336 Datenpunkten doppelt so viele Stichproben wie „Ablassen“ (18.805) oder „Lösen“ (19.552). Die Datenmenge wird durch die Verarbeitung insgesamt um ein Fünftel verkleinert (–21 %).

Merkmalsextraktion

Auf die Merkmalsextraktion wird verzichtet. Bei der Datenextraktion geht es um die Umwandlung bzw. Neuschaffung von zusätzlichen künstlich erzeugten Sensordaten. Sie können

Tabelle 7-3: Anzahl der Datenpunkte für die Aktivitätsdaten nach der Gegenüberstellung mit den Sensordaten (eigene Darstellung)

Aktivität	Anzahl Datenpunkte vor Datenverarbeitung	Anzahl Datenpunkte nach Datenverarbeitung
Verrohrung eindrehen	42.336	32.673 (–23 %)
Ablassen	18.805	13.014 (–31 %)
Lösen	19.552	19.472 (0 %)
Ziehen	33.217	22.181 (–33 %)
Leeren	27.961	25.374 (–9 %)
Summe	141.871	112.714 (–21 %)

dem ML-Modell ggf. bei der Klassifizierung unterstützen. Die vorhandenen 20 Sensordaten werden als ausreichend erachtet. Zusätzlicher Rechenaufwand kann damit vermieden werden.

Merkmalsauswahl

Bei der Merkmalsauswahl werden die Merkmale auf ihre Relevanz für das ML-Modell hin untersucht und ggf. aussortiert. Die Auswahl der Merkmale erfolgt unter zwei Gesichtspunkten: (1) Einfluss auf den Zielwert und (2) lineare Abhängigkeit gegenüber anderen Merkmalen. In beiden Fällen wird das Ergebnis, d. h. die Genauigkeit der ML-Modelle, verschlechtert.

Die insgesamt 20 verschiedenen Sensordaten werden auf ihre Relevanz hinsichtlich der ausgewählten Aktivitäten hin untersucht. Es werden zwei Methoden angewendet: (1) Die Varianzfiltermethode nach Das und Cakmak [Das-2018] und die Shapley Additive Explanations (SHAP)-Wertmethode nach Lundberg und Lee [Lun-2017]. Bei der Varianzfiltermethode werden nur Sensordaten mit einer Varianz größer Eins ausgewählt (siehe Hervorhebungen in Tabelle 7-2). Diese Methode wird durch die Ergebnisse der SHAP-Wertmethode bestätigt (siehe Abbildung 7-12).

Je größer der SHAP-Wert, desto bedeutsamer das Merkmal für die Aktivität, z. B. ist die Tiefe, im Gegensatz zu den Pumpendrücken, relevanter für die Aktivität „Ablassen“ (hellblauer Balken) als für die Aktivität „Lösen“ (grüner Balken). Unterschiede zwischen den Ergebnissen der Varianzfilter- und der SHAP-Wertmethode ergeben sich nur bei der Vortriebskraft. Die Vortriebskraft weist bei der SHAP-Wertmethode eine geringere Bedeutung auf als die Neigung des Masts. Da die Varianz für die Neigung kleiner Eins ist, werden sie nicht ausgewählt. Es ist weiterhin zu beachten, dass die Varianzfiltermethode fehleranfällig ist, da die Werte abhängig von deren Einheiten sind und damit niedrigere Werte wie die Neigung nicht weniger relevant sind. Insgesamt werden somit zehn Sensordaten als besonders relevant für die Studie angesehen (siehe Hervorhebungen in Tabelle 7-2).

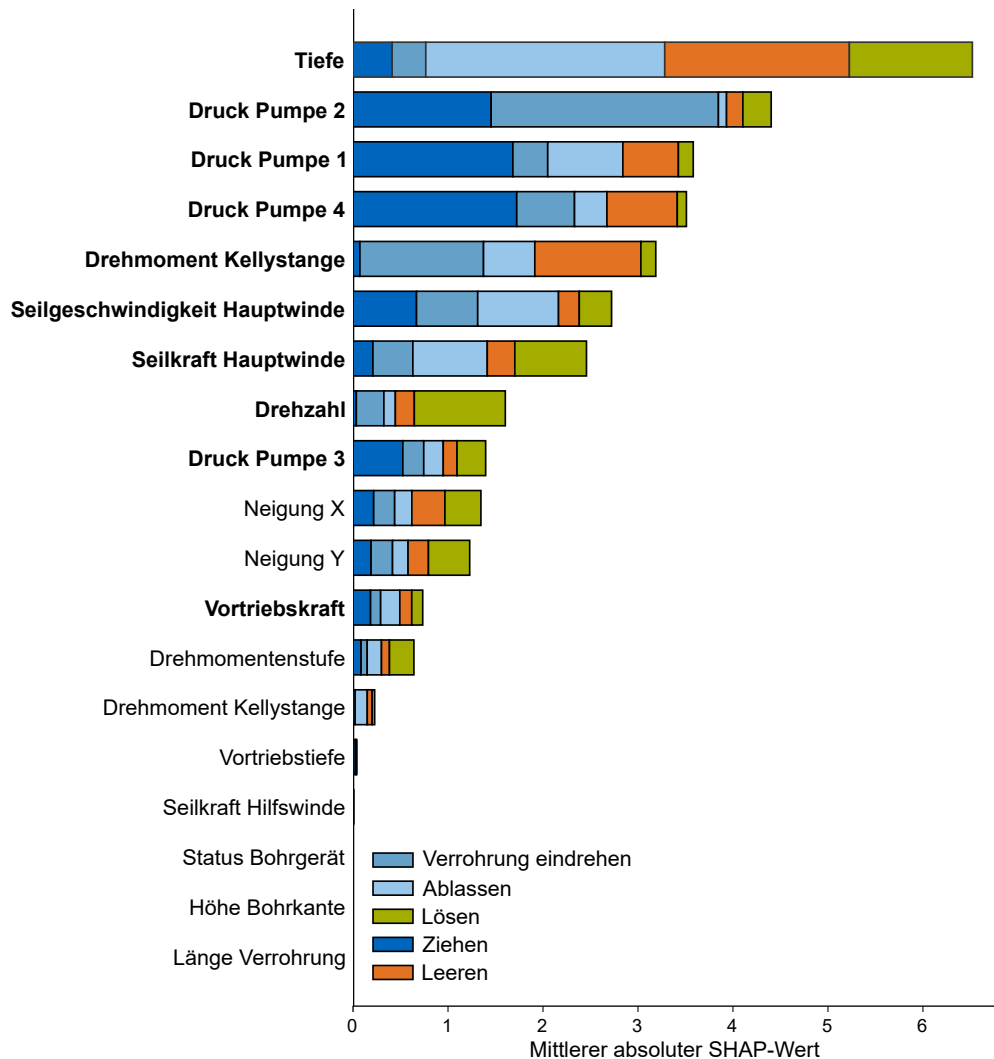


Abbildung 7-12: SHAP-Wert für die Sensordaten in Abhängigkeit von fünf Aktivitäten: (1) Verrohrung eindrehen, (2) Ablassen, (3) Lösen, (4) Ziehen und (5) Leeren (hervorgehoben: ausgewählte Merkmale aus Varianzfiltermethode; eigene Darstellung nach [Fis-2021b; fml-2020i])

Die Korrelationsmatrix in Abbildung 7-13 zeigt in der Hauptdiagonalen die Korrelation von gleichen Datenpunkten an. Entsprechend weisen die Daten untereinander wenig Korrelationen auf. Es gibt außerhalb der Hauptdiagonalen zwei Ausnahmen mit über 70 % Korrelation: Die Drehmomente und die Pumpendrucke. Die Drehmomente der Kellystange und des Kraftdrehkopfes sind beim Bohren gleich. Unterschiede ergeben sich z. B. beim Eindrehen der Verrohrung oder wenn eine Verrohrungsanlage angeschlossen ist. Aufgrund der geringen Relevanz des SHAP-Werts, wurden die Drehmomente der Kellystange vereinfacht nicht weiter berücksichtigt (siehe Tabelle 7-3). Auch die Pumpendrucke verlaufen parallel, um die Verluste bei den Hydraulikdrücken auszugleichen. Trotz der hohen Korrelation werden diese Merkmale aufgrund ihrer spezifischen Relevanz in die Merkmalsauswahl einbezogen.

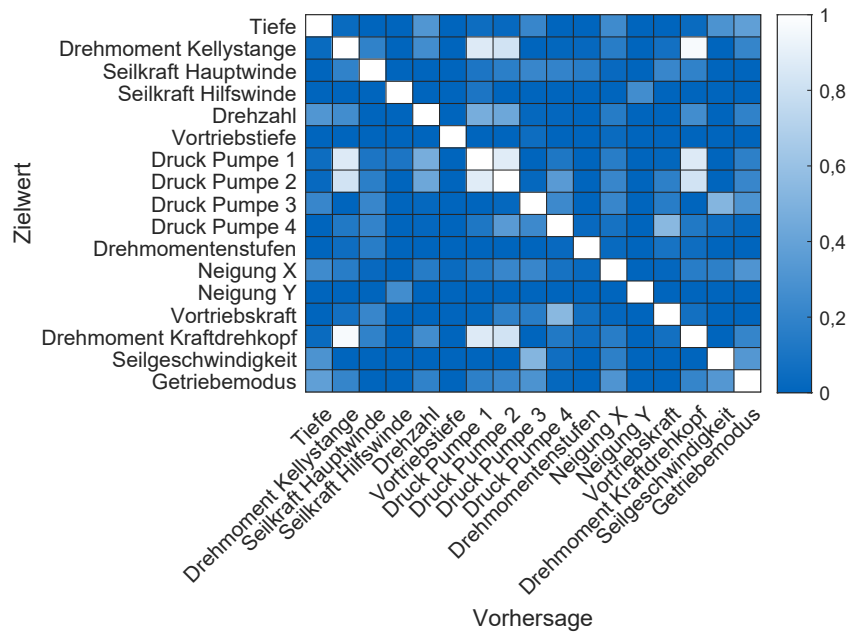


Abbildung 7-13: Absolute Werte der Korrelationskoeffizienten für die Sensordaten (eigene Darstellung nach [fml-2021f])

Modellierung

Der vorbereitete Datensatz dient den Untersuchungen hinsichtlich der Eignung verschiedener ML-Modelle. Diese Modelle werden mit den ausgewählten Merkmalen auf die Erkennung der Zielwerte trainiert.

In Anlehnung an die relevante Literatur (siehe Tabelle 3-4) werden die folgenden fünf ML-Modelle ausgewählt und implementiert: (1) DT, (2) LR, (3) NB, (4) SVM, (5) ANN.

Implementierung

Für die Implementierung wird der Datensatz in einen Trainings- (80 %) und einen finalen Testdatensatz (20 %) geteilt. Die 80 % werden noch einmal in einen Trainings- und Validierungsdatensatz geteilt. Die Zuteilung der Daten für den Trainings- und Validierungsdatensatz erfolgt zufällig mit Hilfe des Kreuzvalidierungsverfahrens. Das Verhältnis wird zu 10:1 gewählt.

Vor dem eigentlichen Training des Datensatzes werden die Hyperparameter für die einzelnen ML-Modelle ausgewählt. Die Auswahl der geeignetsten Konfiguration erfolgt mit Hilfe der Scikit-Learn-Klasse *GridsearchCV()* von Pedregosa et al. [Ped-2012]. Tabelle C-2 in Anhang C zeigt die Übersicht über die variierten und ausgewählten Hyperparameter.

Ergebnisse

Die Kreuzvalidierung der ML-Modelle ist in Abbildung 7-14 dargestellt.

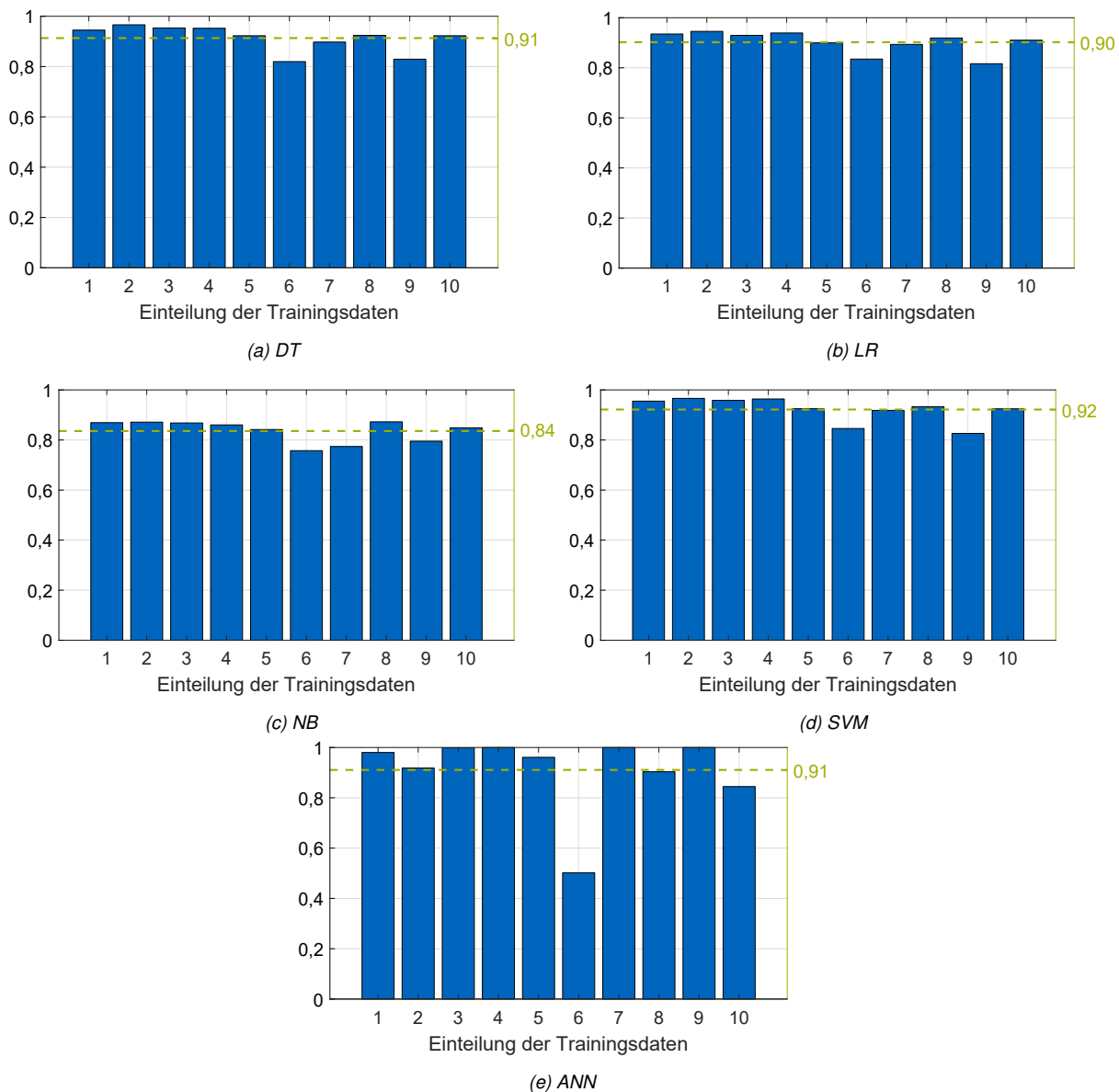


Abbildung 7-14: Kreuzvalidierungen für die ML-Modelle hinsichtlich zehn zufällig eingeteilter Trainingsdatensätze und der Genauigkeit ihrer Vorhersage (eigene Darstellungen nach [Fis-2021b; fml-2020i; fml-2020m])

Mit Ausnahme von NB weisen alle Modelle eine durchschnittliche Genauigkeit von über 90 % auf. Insbesondere die sechste und neunte Einteilung des Testdatensatzes zeigen eine relativ geringe Genauigkeit als Trainings- und Validierungsdaten, während die anderen Einteilungen eine hohe Genauigkeit aufweisen. ANN zeigt auffällige hohe Diskrepanzen und ist damit empfindlicher gegenüber der Aufteilung der Gesamtdaten als Trainings- und Validierungsdaten. Insgesamt zeigt das SVM-Modell die besten Ergebnisse, da die entsprechende durchschnittliche Genauigkeit der Kreuzvalidierung mit einem Maximum von 92 % am höchsten ist.

Die Lernkurven der ML-Modelle sind in Abbildung 7-15 dargestellt.

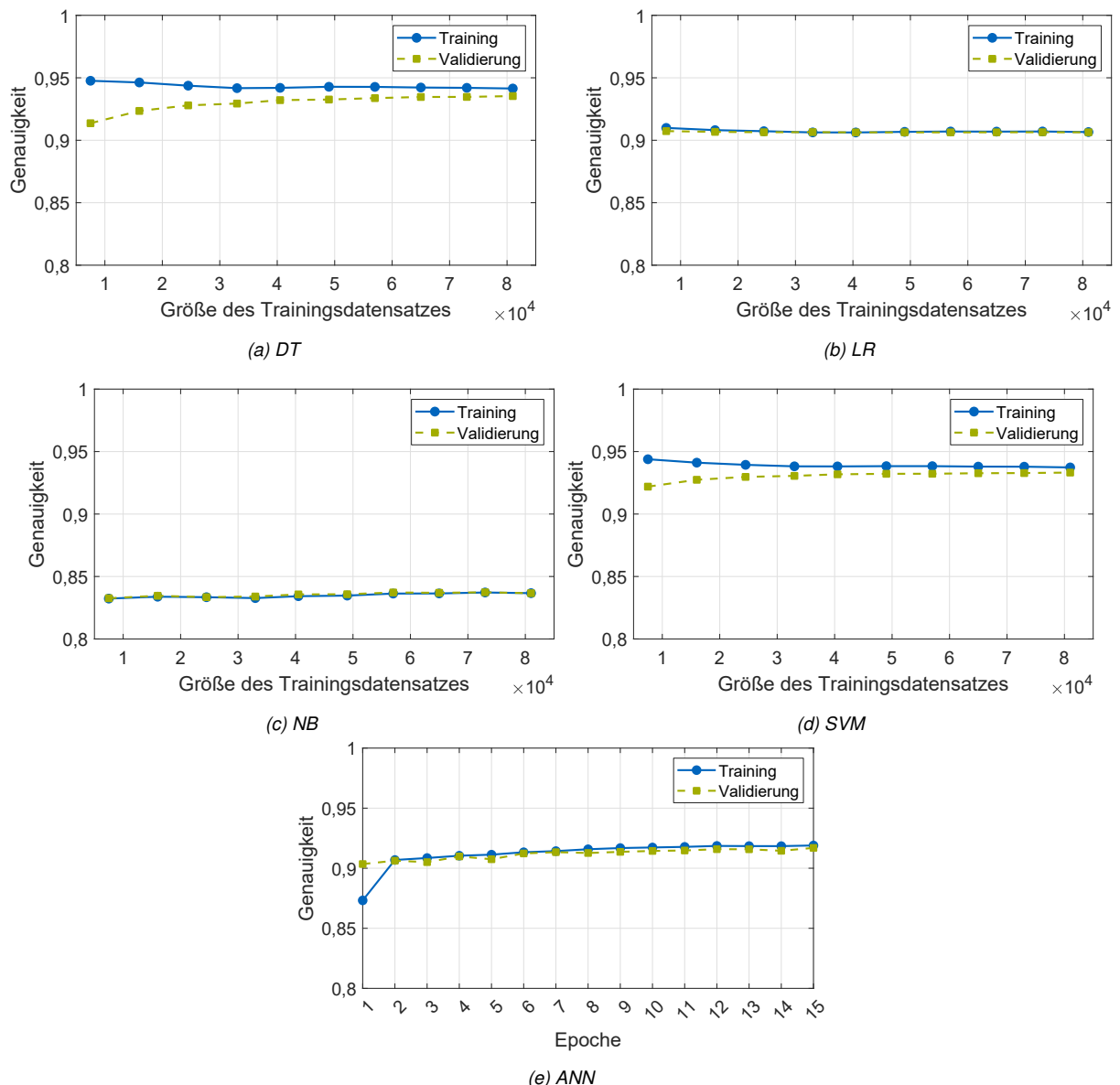


Abbildung 7-15: Lernkurven für die ML-Modelle (eigene Darstellungen nach [Fis-2021b; fml-2020i; fml-2020m])

Bei DT und SVM ist die Konvergenz zu einem Wert für die Trainings- und die Validierungsgenauigkeit besonders ausgeprägt. Auch hier ist die Genauigkeit mit der maximalen Anzahl von Trainingsstichproben am höchsten. Die Trainingsgenauigkeit liegt bei beiden bei 94 %. Die Validierungsgenauigkeit bei 94 % (DT) und 93 % (SVM). Die Lernkurve für ANN ist in Bezug auf die Anzahl der Epochen, nicht auf die Anzahl der Trainingsdaten, angegeben. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Trainings- und Validierungsgenauigkeit eine gute Konvergenz aufweisen. Insgesamt erweist sich die Verwendung mehrerer Daten oder Epochen für das Training als geeignet.

Die Ergebnisse der Lernkurven zeigen, dass die Modelle weder über- noch unterangepasst sind. Mit einer höheren Anzahl von Trainingsstichproben kann das Modell die Validierungsdaten besser vorhersagen und die Validierungsgenauigkeit steigt.

Nachdem die Sensitivität der Modelle gegenüber den Trainingsdaten mittels Kreuzvalidierung und Lernkurven untersucht wurde, wird nun die Genauigkeit der Modelle in Bezug auf die Testdaten mit Hilfe von Konfusionsmatrizen bewertet. Zu diesem Zweck werden 20 % der Gesamtdaten als Testdatensatz definiert. Die Konfusionsmatrix bestimmt die Genauigkeit der ML-Modelle für jede Aktivität.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 7-16 dargestellt.

Für die Aktivität „Leeren“ (0) erreicht DT mit 93 % die höchste Genauigkeit. Im Vergleich dazu ist sie bei NB mit 85 % minimal. Auch für die Aktivität „Ablassen“ (1) erreicht DT mit 82 % die höchste und NB mit 58 % die niedrigste Genauigkeit. Für die Aktivität „Lösen“ (2) liegen die Genauigkeiten aller Modelle bei 92 %. Bei der Aktivität „Ziehen“ (3) liegen die Genauigkeiten aller Modelle bei über 95 %. Bei der Aktivität „Verrohrung eindrehen“ (4) hat nur NB eine geringe Genauigkeit von 78 %. Alle anderen Modelle erreichen eine hohe Genauigkeit von mindestens 94 %. Insgesamt zeigen die beiden ML-Modelle DT und SVM die besten Ergebnisse in Bezug auf die Genauigkeit der Testdaten.

Diskussion

Nach dem Vergleich der verschiedenen implementierten ML-Modelle eignen sich DT und SVM am besten für die Aktivitätserkennung. Im Vergleich ist SVM rechenintensiver, sodass sich DT empfiehlt. Weniger geeignet ist NB. Anders als in der Literatur, z. B. in den Arbeiten von Ahn et al. [Ahn-2015a], Akhavian und Behzadan [Akh-2015b] oder Rashid und Louis [Ras-2020], schneidet ANN schlecht ab. Eine mögliche Ursache kann in der fehlenden Berücksichtigung der Tiefe pro Zeit durch die gewählten Hyperparameter innerhalb des einfachen ANN-Modells sein.

Für die automatisierte Anwendbarkeit ist ein hoher Grad an manueller Vorverarbeitung der Daten zur geeigneten Auswahl von Merkmalen notwendig. Des weiteren können Informationsverluste durch das Entfernen von Datenpunkten bei der Glättung von Rauschen und der Filterung von Ausreißern auftreten. Im Folgenden wird daher ein DL-Ansatz vorgestellt, um diesen Limitationen zu begegnen.

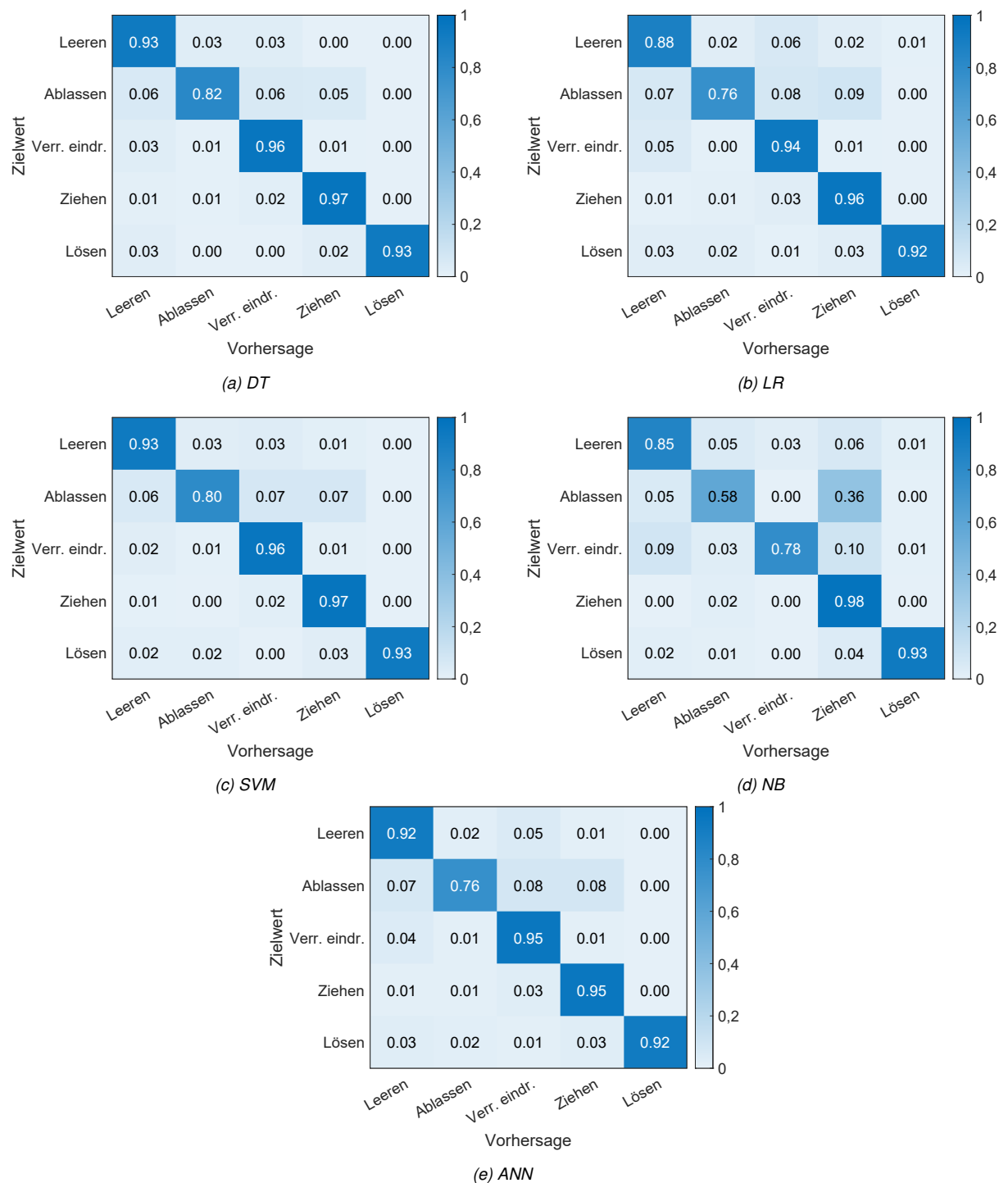


Abbildung 7-16: Konfusionsmatrizen für die ML-Modelle (eigene Darstellungen nach [Fis-2021b; fml-2020i; fml-2020m])

7.5.3 Aktivitätserkennung mit Hilfe von Deep Learning

Vorgehensweise

Der nachfolgende Ansatz baut auf den diskutierten Ergebnissen der ML-Modelle in Abschnitt 7.5.2 auf und setzt auf weiterführende DL-Modelle. Dieser Ansatz wurde im Rahmen der Bachelorarbeit von Beiderwellen Bedrikow [fml-2021f] erarbeitet und gemeinsam mit der Autorin in [Fis-2021c] veröffentlicht.

Die Vorgehensweise orientiert sich an den Methoden für DL-Modelle [Cha-2000; Kim-2019; Stu-2021]. Die aufwendige und fehleranfällige manuelle Datenverarbeitung, Merkmalsextraktion und -auswahl entfallen weitestgehend, da diese Aufgaben durch die Komplexität der DL-Modelle und deren Training automatisiert übernommen werden (siehe Abschnitt 2.2.3).

Datenverarbeitung

Die Datenverarbeitung baut auf den gegenübergestellten Datensätzen aus der vorangegangenen Untersuchung auf (siehe Abschnitt 7.5.2). Statt den üblicherweise nachfolgenden Schritten werden die Daten hier lediglich transformiert. Die Transformation verfolgt das gleiche Ziel wie die Standardisierung [Mül-2017, Kap. 3]. Sie ist notwendig, um die unterschiedlichen Sensordaten und deren Größenordnungen vergleichen zu können. Anders als bei der Standardisierung, werden bei der Transformation die Werte nicht über den gesamten Datensatz, sondern für jedes Merkmal getrennt betrachtet skaliert. Nach der Transformation liegen die Daten im Wertebereich zwischen Null und Eins vor. Dadurch bleibt die Verteilung der Daten erhalten, es kommt zu keinen Verzerrungen, wie es bei der Standardisierung möglich ist.

Modellierung

Es werden zwei DL-Modelle ausgewählt und kombiniert eingesetzt: (1) RNN für die zeitliche Abhängigkeit und (2) CNN für den Umgang mit Rauschen. Beide Modelle werden mit den Basismodellen ANN und LSTM verglichen. Zum einen werden die Ergebnisse mit dem ANN-Modell aus dem vorherigen Abschnitt 7.5.2 verglichen. Statt sechs Zwischenschichten werden vereinfacht fünf Schichten zu je 128 Neuronen implementiert (siehe Tabelle 7-4). Zum anderen werden die kombinierten DL-Modelle mit einem reinen LSTM-Modell aus fünf Schichten mit je 128 Neuronen verglichen (siehe Tabelle 7-4). LSTM wird auch von Rashid und Louis [Ras-2019] für die Aktivitätserkennung von Baugeräten eingesetzt. Die mathematische Formulierung der einzelnen Schichten ist in [Gér-2019] zu finden.

Das vorgeschlagene hybride Modell besteht aus einer Kombination von LSTM und CNN, auch bekannt unter dem Namen DeepConvLSTM. Das DeepConvLSTM-Modell basiert auf den Arbeiten von Ordóñez und Roggen [Ord-2016] für die Erkennung menschlicher

Tabelle 7-4: Architektur der für die Parameterstudie verwendeten DL-Modelle (eigene Darstellung nach [Fis-2021c])

DL-Modell	Netzarchitektur
ANN	5xDense–Softmax
LSTM	5xLSTM–Softmax
DeepConvLSTM	3xCNN–2xLSTM–Softmax
DeepConvBiLSTM	3xCNN–2xBiLSTM–Softmax

Aktivitäten und von Slaton et al. [Sla-2020] für die Erkennung von Aktivitäten von Baugeräten. Es kombiniert die Kurzzeit-Merkmalsextraktionsfähigkeiten der CNN-Schichten mit den Langzeit-Fähigkeiten der LSTM-Schichten zur Modellierung zeitlicher Abhängigkeiten.

Die in Ordóñez und Roggen [Ord-2016] vorgeschlagene Originalarchitektur besteht aus einer Eingabeschicht, vier CNN-Schichten, zwei LSTM-Schichten und einer Softmax-Aktivierungsschicht. Auf eine Pooling-Schicht wird bewusst verzichtet. Anders als in der Bilderkennung können bei der zeitabhängigen Aktivitätserkennung ggf. wichtige Merkmale verloren gehen [Ord-2016; Sla-2020]. Zur Verbesserung des Trainings verwenden Slaton et al. [Sla-2020] ein leicht modifiziertes Modell. Zur Beschleunigung und Stabilisierung werden zwischen den CNN-Schichten zusätzliche Schichten zur Normalisierung des Eingangsvektors, sogenannte Batch Normalisierungsschichten [Dat-2023a], hinzugefügt. Außerdem wird eine Dropout-Schicht (dt. Abbruch-Schicht) mit einer Abbruchrate von 30 % zwischen den CNN- und LSTM-Schichten eingefügt, um das Risiko von Overfitting weiter zu verringern, d. h. es werden in jedem Trainingslauf zufällig 30 % der Knotenverbindungen zu Null gesetzt und nicht weiter verwendet [Dat-2023b].

Das in dieser Arbeit verwendete unidirektionale Modell basiert auf dem von Slaton et al. [Sla-2020] verwendeten Modell mit einer Eingabeschicht, Faltungsschichten, zwei rekurrenten LSTM-Schichten und einer Softmax-Aktivierungsschicht. Die geringfügigen Änderungen bestehen darin, dass die Anzahl der Faltungsschichten von vier auf drei reduziert wird und dass zwischen den LSTM-Schichten zusätzliche Dropout-Schichten eingefügt werden (siehe Tabelle 7-4).

Neben der unidirektionalen Architektur wird auch eine bidirektionale Architektur untersucht. Der grundlegende Unterschied zwischen uni- und bidirektionalen RNN besteht darin, dass bei bidirektionalen RNN die Eingabesequenzen in beide Richtungen verarbeitet werden: einmal von links nach rechts und einmal von rechts nach links [Gér-2019]. Bidirektionale RNN finden Anwendungen in der natürlichen Sprachverarbeitung. Xu et al. [Xu-2019] nutzten sie auch für die Erkennung menschlicher Aktivitäten. Bei der Verwendung von bidirektionalen Schichten wird ein geringer Anstieg der Genauigkeit beobachtet. Die vorgeschlagene bidirektionale Architektur (DeepConvBiLSTM) ist eine Modifikation der unidirektionalen Architektur und

besteht weiterhin aus einer Eingabeschicht, drei Faltungsschichten, zwei rekurrenten LSTM-Schichten und einer Softmax-Aktivierungsschicht (siehe Tabelle 7-4). Die beiden LSTM-Schichten werden jedoch durch zwei bidirektionale LSTM-Schichten (BiLSTM) ersetzt. Die Anzahl der Zellen innerhalb jeder Schicht wird nicht verändert.

Implementierung

Die Datenaufteilung des Datensatzes für die Implementierung erfolgt wie schon bei den ML-Modellen zufällig: 70 % Trainings- (davon 20 % Validierungs-) und 30 % Testdaten. Ergänzende Untersuchungen zu einer Aufteilung des Datensatzes nach Tagen zeigt Beiderwellen Bedrikow [fml-2021f]. Die Ergebnisse führen insgesamt zu einer Verschlechterung der Ergebnisse um 52 %.

Um einen angemessenen Vergleich der Modelle zu ermöglichen und die Berechnungszeit gering zu halten, wird keine Abstimmung der Hyperparameter vorgenommen. Alle Modelle werden mit den in Tabelle C-2 in Anhang C aufgeführten Hyperparametern trainiert. Jedes Netz wird fünfmal trainiert, um die statistischen Schwankungen der Ergebnisse zu berücksichtigen. Die Bewertung der Qualität der Modelle basiert auf der Genauigkeit und dem F1-Wert der Vorhersagen des Modells. Werden Aussagen über den gesamten Datensatz getroffen, werden die Ergebnisse der Klassen gemittelt. Die Berechnungsformeln sind in [Gér-2019] erläutert.

Ergebnisse

Der Trainingsverlauf für alle vier Modelle mit einer Fenstergröße von 16 Sekunden ist in Abbildung 7-17 dargestellt.

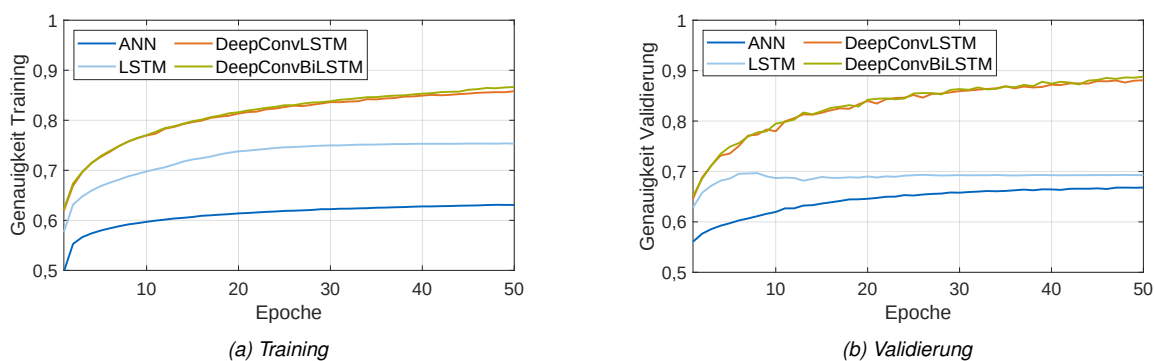


Abbildung 7-17: Lernkurven für die DL-Modelle (eigene Darstellungen nach [Fis-2021c; fml-2020ij])

Das einfache ANN-Modell schneidet am schlechtesten ab. Sowohl die Trainings- als auch die Validierungsgenauigkeit liegen unter 70 %. Dieses Modell hat Schwierigkeiten, die Daten gut zu modellieren, was auf eine Unteranpassung hindeutet. Das LSTM-Modell zeigt bessere

Ergebnisse. Die Trainingsgenauigkeit der Hybridmodelle zeigt die beste Trainingsleistung. Die Diagramme sind nahezu deckungsgleich und zeigen eine klare Konvergenz des Trainings an. Die Kurve für das DeepConvBiLSTM verläuft etwas höher als die des DeepConvLSTM und zeigt am Ende des Trainings eine leichte Tendenz zum weiteren Anstieg.

Wie bereits erwähnt, werden die Modelle an den noch nicht bekannten Daten getestet. Die Testgenauigkeit und der $F1$ -Wert für jedes Modell sind in Tabelle 7-5 aufgeführt.

Tabelle 7-5: Genauigkeit und $F1$ -Wert der implementierten DL-Modelle (eigene Darstellung nach [Fis-2021c])

DL-Modell	Genauigkeit	$F1$ -Wert
ANN	67 %	53 %
LSTM	70 %	61 %
DeepConvLSTM	89 %	84 %
DeepConvBiLSTM	89 %	85 %

Sowohl das DeepConvLSTM als auch die bidirektionale Variante DeepConvBiLSTM weisen eine Testgenauigkeit von bis zu 89 % auf, verglichen mit bis zu 67 % für die ANN- und 70 % für die LSTM-Modelle. Die Verwendung bidirektionaler Schichten wirkt sich im Vergleich zum Hybridmodell mit unidirektionalen Schichten nicht signifikant auf die Gesamtgenauigkeit der Modelle aus, führt aber zu einem Anstieg des $F1$ -Werts.

Bereits mit der Erhöhung der Fenstergröße auf 32 Sekunden verbessern sich die Ergebnisse erheblich und alle Genauigkeiten oder $F1$ -Werte liegen über 90 % [Fis-2021c]. Die Ergebnisse verbessern sich weiter mit der Erhöhung auf 60 Sekunden. Sowohl die Genauigkeit als auch der $F1$ -Wert sind mindestens 97 % für die fünf betrachteten Aktivitäten. Abbildung 7-18 zeigt die Ergebnisse am Beispiel des DeepConvBiLSTM-Modells.

Diskussion

Im Vergleich mit der Literatur liegen die Ergebnisse über den sehr guten Ergebnissen von Slaton et al. [Sla-2020] (ca. 80 %). Die Datenmenge ist dabei mit 145.068 Datenpunkten im Vergleich zu den vorliegenden 141.871 Datenpunkten ähnlich. Dennoch ist eine direkte Vergleichbarkeit schwierig, da unterschiedliche Bauprozesse bzw. -geräte (Walze und Radlader mit externen Sensoren) betrachtet werden. Die Daten kommen von Beschleunigungsmessern und liegen mit 100 Hz deutlich über der vorliegenden Messfrequenz von 1 Hz. Entsprechend reicht eine Fenstergröße von 2 Sekunden im Vergleich zu den vorliegenden 16 Sekunden aus.

Verglichen mit den ML-Modellen im vorhergehenden Abschnitt 7.5.2 schneiden die DL-Modelle damit besser ab. Anhand des ANN-Modells kann der Einfluss der Datenverarbeitung

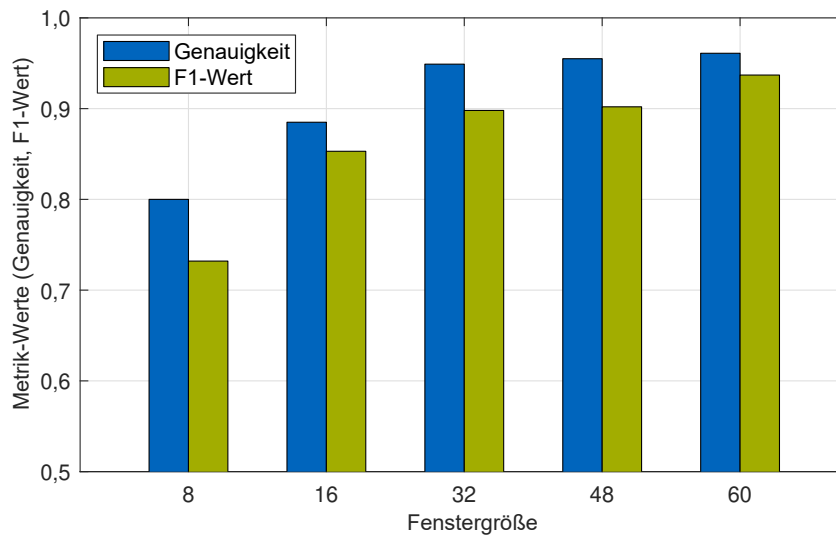


Abbildung 7-18: Vergleich der Fenstergrößen für das DeepConvBiLSTM-Modell (eigene Darstellung nach [Fis-2021c; fml-2021f])

aufgezeigt werden. Obwohl das ANN-Modell eine ähnliche Architektur verwendet, wird nur eine Gesamttestgenauigkeit von 67 % statt 90 % wie in Abbildung 7-16e erreicht. Die starke manuelle Datenverarbeitung inkl. Merkmalsextraktion und -auswahl führt dazu, dass die Sensordaten stark gefiltert sind und es keine Ausreißer oder Sensorrauschen gibt. Werden die Sensordaten direkt vom Gerät verwendet, d. h. mit Ausreißern oder Rauschen, verschlechtern sich die Ergebnisse deutlich.

Die Bedeutung der zeitlichen Abhängigkeiten in der Modellierung führt zu einer deutlichen Verbesserung der Leistung der DL-Modelle. Das LSTM-Modell erzielt bessere Ergebnisse, allerdings unter Vorbehalt, da Overfitting nicht ausgeschlossen werden kann.

Die Kombination mit CNN erzielt die besten Ergebnisse. Obwohl beide Hybridmodelle, DeepConvLSTM und DeepConvBiLSTM, weniger LSTM-Schichten und keine Vorverarbeitung der Sensordaten haben, werden bessere Ergebnisse erzielt. Damit bestätigt sich, wie in der Literatur [Ord-2016; Sla-2020], dass CNN ein geeignetes Werkzeug für die Aktivitätserkennung von Sensordaten bei Baugeräten ist. Die Verwendung von bidirektionalen LSTM-Schichten trägt zu einer leichten Verbesserung der Leistung bei. Die Fenstergröße sollte möglichst groß gewählt werden.

Bisher wurden nur fünf der 27 Aktivitäten des Datensatzes betrachtet. Diese erhöhte Anzahl an Klassen kann einen entscheidenden Einfluss auf die Modelle haben, da weitere Unterschiede in den Daten erkannt und klassifiziert werden müssen.

7.5.4 Hierarchische Klassifizierungsstudie zum Einfluss der Datenmodellierung bei der Aktivitätserkennung

Vorgehensweise

Die vorgestellte Vorgehensweise für DL-Modelle im vorherigen Abschnitt 7.5.3 offenbart weitere Fragestellungen und Potenzial bzgl. ihrer Generalisierbarkeit:

1. **Datensammlung:** Die 27 Aktivitätsdaten wurden unabhängig von der Aktivitätserkennung aufgenommen (siehe Abschnitt 7.4). Sie sind prozessbasiert, nicht datenbasiert, d. h. die Aufteilung der Klassen wird durch das Bauunternehmen definiert und mit Hilfe einer eigenen Software manuell erfasst. Die Klassifizierung zielt grundsätzlich auf die Differenzierung von wertschöpfenden und nicht-wertschöpfenden Bauprozessen ab, z. B. um die Verspätung von Betonfahrzeugen zu identifizieren. Sie orientiert sich nicht an den begrenzten Möglichkeiten der Sensordaten zur Beschreibung von Aktivitäten, wie im BPPR-Modell ersichtlich (siehe Abbildung 7-9). Erfordernisse für das Training und die Validierung der DL-Modelle werden ebenfalls nicht bedacht.
2. **Datenaufbereitung:** Die Aufteilung des Datensatzes erfolgt zufällig. Aufgrund der relativ geringen Häufigkeit und der langsamen Zustandsänderungen der Gerätebewegungen können zwei beobachtbare Stichproben ähnlich sein, sich aber einmal in der Trainings- und einmal in der Testmenge befinden. Der Trainings- und der Testdatensatz sind daher vermutlich zu ähnlich, so dass die Datenpunkte und nicht deren Beziehungen vom Modell gelernt werden, was in der Anwendung zu falschen Ergebnissen führt.

Bisherige Untersuchungen in der Literatur, z. B. in [Akh-2015b; Har-2021], zeigen, dass die Leistung der ML-Modelle mit zunehmenden zu klassifizierenden Aktivitäten abnimmt. Sie schlagen daher eine hierarchische Klassifizierung vor, um die Aktivitäten in kleinere Teilmengen zu zerlegen.

Die nachfolgende Untersuchung wurde im Rahmen der Bachelorarbeit von Beiderwellen Bedrikow [fml-2021f] durchgeführt und gemeinsam mit der Autorin in [Fis-2023a] veröffentlicht.

Hierarchische Klassifizierung

Die folgende Studie basiert auf der hierarchischen Klassifizierung nach Harichandran et al. [Har-2021] (siehe Abschnitt 3.2.3). Abbildung 7-19 gibt einen Überblick über die insgesamt drei hierarchischen LoDs (siehe Abschnitt 3.2.3).

Für jede übergeordnete Klasse wie z. B. „Arbeit“ wird ein Klassifikator trainiert, der zwischen den untergeordneten Knoten („Bohren“, „Bewehren“, „Betonieren“ und „Verrohrungsanlage“)

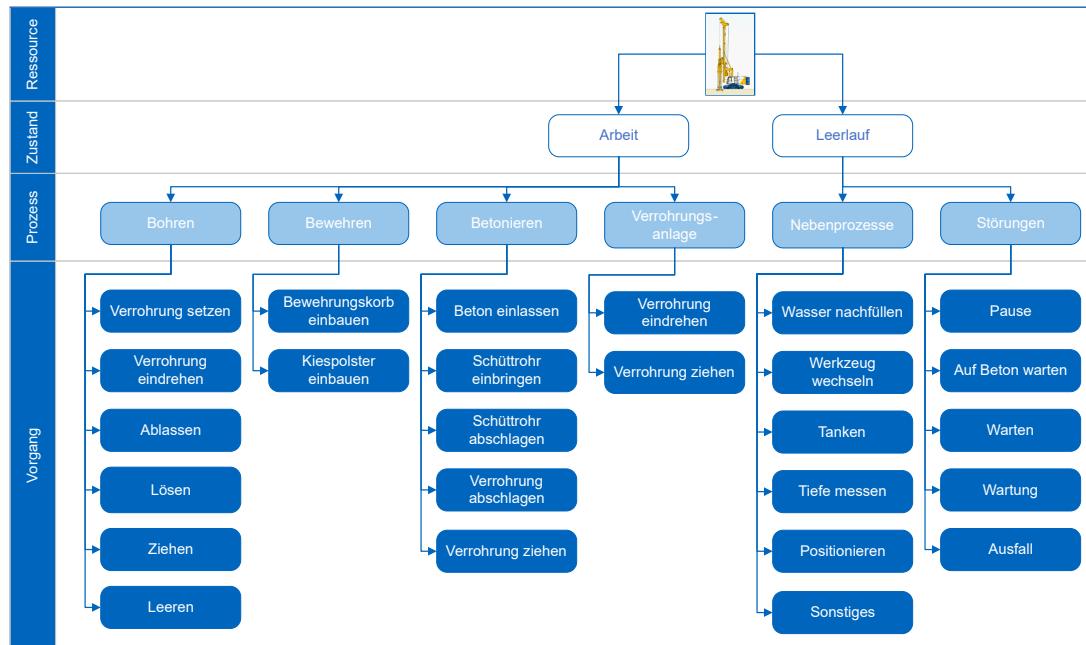


Abbildung 7-19: Übersicht über die LoDs für die hierarchische Klassifizierung (weiß: LoD 1; hellblau: LoD 2; blau: LoD 3; eigene Darstellung nach [Fis-2023a; fml-2021f]; Bildrechte: Bauer AG [BAU-2023])

klassifizieren kann. Anstelle von 27 zu klassifizierenden Aktivitäten (flache Klassifizierung) muss der Klassifikator nur noch maximal bis zu sechs Aktivitäten berücksichtigen (untergeordnete Knoten von z. B. „Bohren“).

LoD 1 beschreibt den Zustand des Bohrgeräts (Ressource), der zwischen „Arbeit“ und „Leerlauf“ unterscheidet. Die Klasse „Arbeit“ enthält alle Aktivitäten, an denen das Bohrgerät aktiv beteiligt ist. Zu den untergeordneten Klassen gehören die Teilprozesse zur Pfahlproduktion: „Bohren“, „Bewehren“, „Betonieren“ und „Verrohrungsanlage“ (siehe Abbildung 7-7). Die übergeordnete Klasse „Leerlauf“ (LoD 1) unterscheidet zwischen „Nebenprozessen“ und „Störungen“ (LoD 2). Das darunterliegende dritte LoD (LoD 3) beschreibt die Vorgänge der Teilprozesse, aufgeschlüsselt in einzelne Aktivitäten.

Die Hyperparameter sind die gleichen wie in Abschnitt 7.5.3 (siehe Tabelle C-3).

Ergebnisse

Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden im Folgenden für die Konfusionsmatrizen nur die Ergebnisse des DeepConvBiLSTM-Modells gezeigt, da es die besten Ergebnisse im Vergleich zu den anderen Modellen aufweist. Alle weiteren Ergebnisse sind in den Abbildungen C-4 bis C-8 in Anhang C abgebildet.

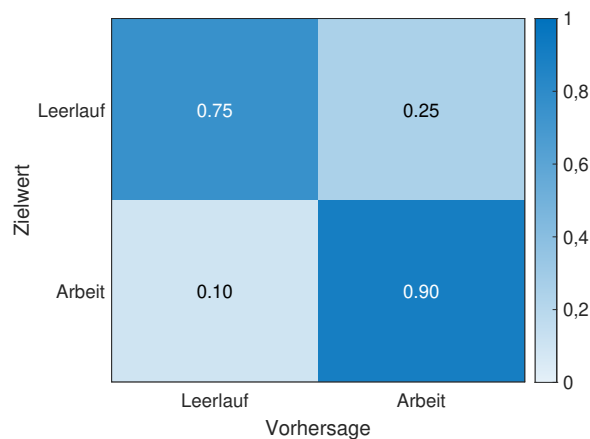
Die Ergebnisse für den $F1$ -Wert der Klassifizierung innerhalb der **ersten Detailebene (LoD1)** sind in Tabelle 7-6 gelistet.

Tabelle 7-6: *F1-Werte für die ausgewählten Aktivitäten für LoD1 (eigene Darstellung nach [fml-2021f])*

Aktivität	ANN	DeepConvLSTM	DeepConvBiLSTM
Arbeit	0,86	0,87	0,86
Leerlauf	0,80	0,82	0,80
Durchschnitt	0,83	0,84	0,83

Die durchschnittlichen $F1$ -Werte reichen von 0,83 (ANN und DeepConvBiLSTM) bis 0,84 (DeepConvBiLSTM) und sind damit in allen drei Modellen ähnlich. Unterschiede zeigen sich in den Ergebnissen für die einzelnen Aktivitäten. Der $F1$ -Wert ist in allen drei Modellen für die Aktivität „Arbeit“ mit maximal 0,87 (DeepConvLSTM) höher als für „Leerlauf“ mit maximal 0,82 (DeepConvLSTM).

Abbildung 7-20 zeigt die Konfusionsmatrix für das DeepConvBiLSTM-Modell.

Abbildung 7-20: *LoD1-Konfusionsmatrix für DeepConvBiLSTM (eigene Darstellung nach [Fis-2023a; fml-2021f])*

Die Aktivität „Arbeit“ wird mit einer Genauigkeit von 90 % klassifiziert. Die restlichen 10 % werden fälschlicherweise als „Leerlauf“ klassifiziert. Die Genauigkeit für die richtige Klassifizierung der Aktivität „Leerlauf“ beträgt 75 %.

Im Vergleich mit den beiden anderen Modellen zeigt sich, dass die hybriden Modelle, DeepConvLSTM und DeepConvBiLSTM, bessere Ergebnisse liefern als das ANN-Modell. Das ANN-Modell hat eine Genauigkeit von nur 70 % für „Arbeit“ und 73 % für „Leerlauf“ (siehe Abbildung C-4a in Anhang C). Das DeepConvLSTM-Modell hat eine Genauigkeit von 91 % für „Arbeit“ und 78 % für „Leerlauf“ (siehe Abbildung C-4b in Anhang C).

Alle Modelle haben sehr große Schwierigkeiten in der Erkennung von „Leerlauf“. Ein Grund dafür ist die begrenzte Anzahl von Stichproben im Datensatz, welche weniger als ein Viertel des gesamten Datensatzes ausmachen (167.707 Trainingsdaten für „Arbeiten“ (76,7 %); 51.042 Trainingsdaten für „Leerlauf“ (23,3 %)).

Die Ergebnisse für den $F1$ -Wert der Klassifizierung innerhalb der **zweiten Detailebene (LoD2)** sind in den Tabellen 7-7 und 7-8 gelistet.

Auch hier zeigt sich, dass die hybriden Modelle deutlich besser abschneiden: Weist das ANN-Modell nur einen durchschnittlichen $F1$ -Wert von 0,42 für die Aktivitäten innerhalb von „Arbeit“ auf, so liegen die durchschnittlichen $F1$ -Werte bei 0,58 bzw. 0,62 für die beiden hybriden Modelle DeepConvLSTM bzw. DeepConvBiLSTM (siehe Tabelle 7-7).

Tabelle 7-7: $F1$ -Werte für die ausgewählten Aktivitäten für LoD2 „Arbeit“ (eigene Darstellung nach [fml-2021f])

Aktivität	ANN	DeepConvLSTM	DeepConvBiLSTM
Bohren	0,89	0,94	0,95
Bewehren	0,20	0,36	0,49
Betonieren	0,57	0,79	0,81
Verrohrungsanlage	0,00	0,21	0,21
Durchschnitt	0,42	0,58	0,62

Eine ähnliche Tendenz zeigen die durchschnittlichen $F1$ -Werte für die Aktivitäten innerhalb von „Leerlauf“ an mit durchschnittlichen $F1$ -Werten von 0,66 für das ANN-Modell und 0,74 bzw. 0,73 für das DeepConvLSTM- bzw. DeepConvBiLSTM-Modell (siehe Tabelle 7-8).

Tabelle 7-8: $F1$ -Werte für die ausgewählten Aktivitäten für LoD2 „Leerlauf“ (eigene Darstellung nach [fml-2021f])

Aktivität	ANN	DeepConvLSTM	DeepConvBiLSTM
Störungen	0,72	0,78	0,78
Nebenprozesse	0,60	0,69	0,67
Durchschnitt	0,66	0,74	0,73

Abbildung 7-21 zeigt die Konfusionsmatrix für das DeepConvBiLSTM-Modell.

Die Aktivitäten für „Bohren“ und „Betonieren“ werden mit einer sehr hohen Genauigkeit von 99 % und 89 % klassifiziert (siehe Abbildung 7-21a). Die beiden anderen Aktivitäten „Bewehren“ und „Verrohrungsanlage“ schneiden mit 38 % und 14 % deutlich schlechter ab. Ähnliche Tendenzen zeigen die Ergebnisse der anderen beiden Modelle (siehe Abbildungen C-5 und C-6 in Anhang C), wobei auch hier wieder die hybriden Modelle besser abschneiden. Die Aktivitäten für „Nebenprozesse“ und „Störungen“ werden mit einer geringeren Genauigkeit von 70 % und 75 % klassifiziert (siehe Abbildung 7-21b). Die vergleichsweise hohen Werte für die Genauigkeiten im Vergleich zu den geringeren $F1$ -Werten liegt an den Schwierigkeiten der Modelle, bestimmte Aktivitäten zu unterscheiden wie z. B. „Bewehren“ und „Verrohrungsanlage“ oder den Aktivitäten für „Leerlauf“.

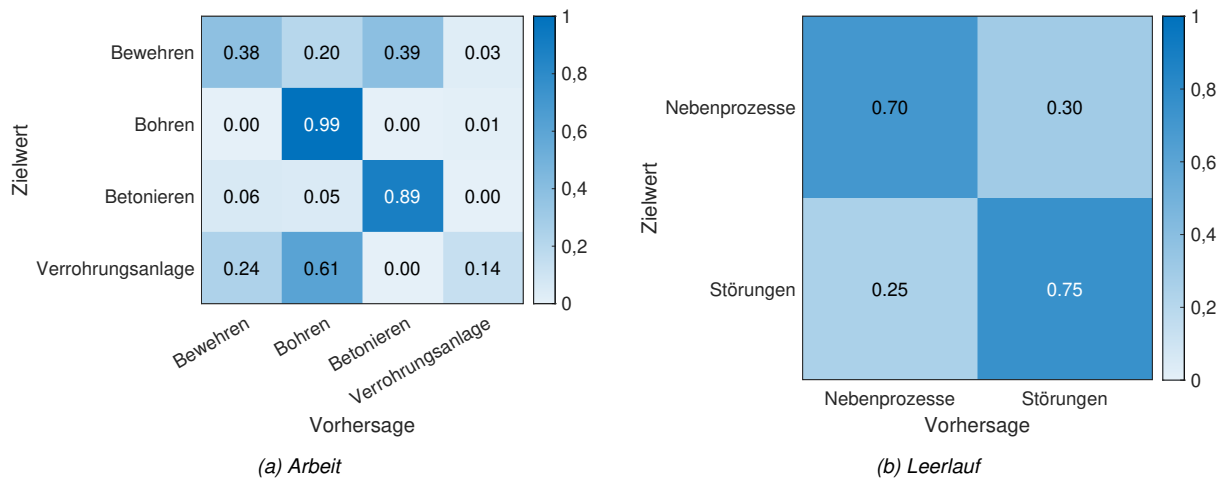


Abbildung 7-21: LoD2-Konfusionsmatrizen für DeepConvBiLSTM (eigene Darstellungen nach [Fis-2023a; fml-2021f])

Für die Klassifizierung innerhalb der **dritten Detailebene (LoD3)** mit der detaillierten Beschreibung der Vorgänge bestätigt sich, dass insbesondere die Aktivität „Bohren“ von den beiden hybriden Modellen mit einem durchschnittlichen $F1$ -Wert von 0,85 sehr gut klassifiziert wird (siehe Tabelle 7-9). Dabei schneiden die hybriden Modelle deutlich besser ab als das ANN-Modell mit einem durchschnittlichen $F1$ -Wert von 0,59.

Tabelle 7-9: $F1$ -Werte für die ausgewählten Aktivitäten für LoD3 „Bohren“ (eigene Darstellung nach [fml-2021f])

Aktivität	ANN	DeepConvLSTM	DeepConvBiLSTM
Ablassen	0,00	0,73	0,72
Lösen	0,81	0,84	0,83
Ziehen	0,60	0,86	0,87
Leeren	0,43	0,85	0,86
Verrohrung setzen	0,89	0,93	0,93
Verrohrung eindrehen	0,81	0,90	0,89
Durchschnitt	0,59	0,85	0,85

Auch die Konfusionsmatrix in Abbildung 7-22a hebt die eindeutige Zuweisung der Aktivitäten hervor. Einzig die Aktivität „Ablassen“ wird, wie auch schon bei der flachen Klassifizierung (siehe Abbildung 7-16), schlechter vorhergesagt. Ein Grund ist die geringere Anzahl an Datenpunkten (siehe Tabelle 7-3).

Für die Aktivität „Bewehren“ sind die durchschnittlichen $F1$ -Werte mit maximal 68 % niedrig (siehe Tabelle 7-10). Die Konfusionsmatrix in Abbildung 7-22b zeigt keine deutliche Herausbildung der Hauptdiagonalen und damit die Schwierigkeiten, die Aktivitäten auseinander zu halten. Das entspricht den Beobachtungen aus der Praxis: Die Aktivitäten können von einem

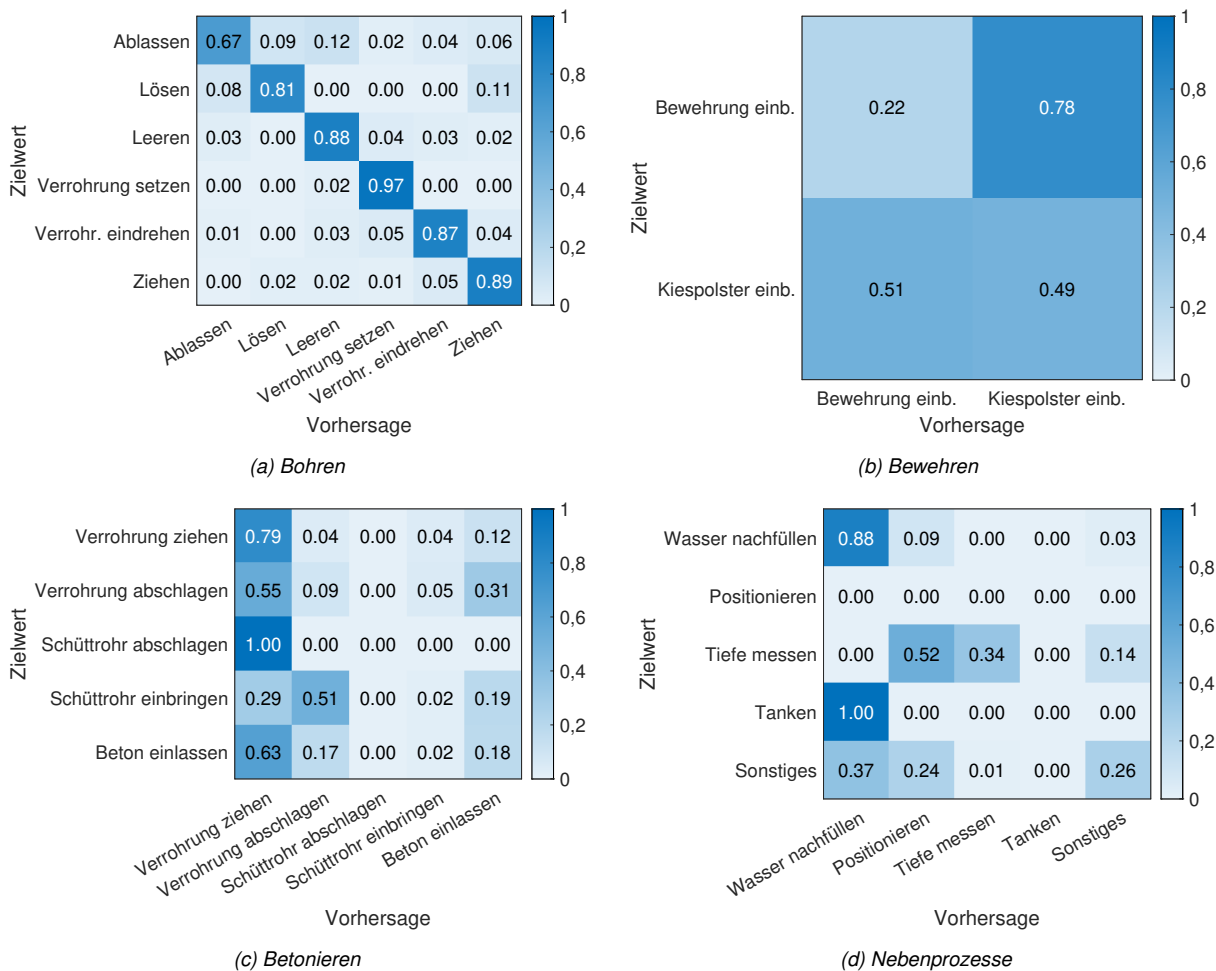


Abbildung 7-22: LoD3-Konfusionsmatrizen für das DeepConvBiLSTM (eigene Darstellungen nach [Fis-2023a; fml-2021f])

Hilfsgerät oder einem Kran ausgeführt werden, was es für die Modelle schwierig macht, unterschiedliche Verhaltensweisen für dieselbe Kategorie zu erfassen, z. B. wird beim Einbringen eines Bewehrungskorbs keine Geräteaktivität erkannt, was zu Fehlklassifikationen führt.

Die Aktivität „Betonieren“ wird insgesamt weniger gut vorhergesagt. Der durchschnittliche $F1$ -Wert ist maximal 0,24 (siehe Tabelle 7-11). Die Modelle neigen dazu, die beiden häufigsten Aktivitäten, „Betonieren“ und „Verrohrung setzen“, miteinander zu verwechseln. Z. B. zeigt die Konfusionsmatrix in Abbildung 7-22, dass mit einer Genauigkeit von 79 % das DeepConvBiLSTM-Modell die Aktivität „Betonieren“ statt „Verrohrung ziehen“ vorhersagt.

Für die Nebenprozesse schneiden alle drei Modelle ähnlich schlecht ab mit einem durchschnittlichen maximalen $F1$ -Wert von 0,46 (siehe Tabelle 7-12). Die hybriden Modelle bringen keinen nennenswerten Vorteil. Eine gute Klassifikation wird nur bei der Aktivität „Wasser nachfüllen“ erreicht mit einem $F1$ -Wert von 0,82 und einer Genauigkeit von 88 % für das DeepConvBiLSTM-Modell (siehe Tabelle 7-12 und Abbildung 7-22c). Bei den restlichen

Tabelle 7-10: F1-Werte für die ausgewählten Aktivitäten für LoD3 „Bewehren“ (eigene Darstellung nach [fml-2021f])

Aktivität	ANN	DeepConvLSTM	DeepConvBiLSTM
Bewehrungskorb einbauen	0,79	0,80	0,80
Kiespolster einbauen	0,56	0,56	0,56
Durchschnitt	0,68	0,68	0,65

Tabelle 7-11: F1-Werte für die ausgewählten Aktivitäten für LoD3 „Betonieren“ (eigene Darstellung nach [fml-2021f])

Aktivität	ANN	DeepConvLSTM	DeepConvBiLSTM
Verrohrung ziehen	0,06	0,19	0,13
Verrohrung abschlagen	0,00	0,00	0,08
Schüttrohr einbringen	0,49	0,00	0,00
Schüttrohr abschlagen	0,00	0,56	0,51
Betonieren	0,43	0,47	0,48
Durchschnitt	0,20	0,24	0,24

Aktivitäten ist eine Klassifikation schwierig, da das Bohrgerät entweder keine signifikanten Bewegungen durchführt, z. B. beim Tanken, oder keine eindeutige Beschreibung zugeordnet werden kann, wie bei der Aktivität „Sonstiges“.

Tabelle 7-12: F1-Werte für die ausgewählten Aktivitäten für LoD3 „Nebenprozesse“ (eigene Darstellung nach [fml-2021f])

Aktivität	ANN	DeepConvLSTM	DeepConvBiLSTM
Wasser nachfüllen	0,82	0,82	0,82
Tiefe messen	0,40	0,40	0,46
Tanken	0,00	0,00	0,00
Sonstiges	0,35	0,35	0,37
Durchschnitt	0,39	0,39	0,41

Diskussion

Wie bei der flachen Klassifikationsstudie im vorhergehenden Abschnitt 7.5.3 schneiden auch hier die hybriden DL-Modelle besser ab als das ANN-Modell. In der ersten Detailebene haben die Modelle Schwierigkeiten, zwischen den zwei grundlegenden Zuständen des Bohrgeräts, „Arbeit“ und „Leerlauf“, zu unterscheiden. Grund dafür sind die unterschiedlich großen Datenmengen. Die zweite und dritte Detailebene zeigen, dass die Aktivität „Bohren“ mit den untergeordneten Aktivitäten besonders von den beiden DL-Modellen gut klassifiziert werden kann (durchschnittlicher $F1$ -Wert von bis zu 0,95 (LoD2) bzw. 0,85 (LoD3) in Tabelle 7-7 und 7-9).

Verglichen mit der flachen Klassifikationsstudie im vorhergehenden Abschnitt 7.5.3 schneidet die hierarchische Klassifikation schlechter ab. Der Durchschnitt aus den durchschnittlichen $F1$ -Werten für den LoD3 aus dem DeepConvBiLSTM-Modell beträgt 54 % (siehe Tabelle 7-9), statt insgesamt 85 % bei der flachen Klassifikation (siehe Tabelle 7-5). Obwohl die Ergebnisse für den Bohrvorgang selbst (85 %) gut passen, werden die Vorgänge für „Bewehren“ (65 %), „Betonieren“ (24 %) und die Nebenprozesse (41 %) mit einer geringen Genauigkeit klassifiziert.

Die Auswahl der Klassen stellt ein großes Problem für die Aktivitätserkennung dar. Bestimmte Aktivitäten erweisen sich als sehr schwierig zu klassifizieren. Die meisten Fehlklassifizierungen fanden zwischen bestimmten Aktivitäten statt. Abbildung 7-23 zeigt die Rohdaten.

Als einfaches Beispiel können die Aktivitäten „Betonieren“ und „Warten auf Beton“ betrachtet werden. Alle Sensorsignale sind konstant, abgesehen von etwas vorhandenem Rauschen (siehe Abbildungen 7-23a und 7-23b). Es besteht ein Unterschied zum Verhalten während des Bohrens (siehe Abbildung 7-23c). Bei beiden Aktivitäten wartet das Bohrgerät nur passiv, während der Vorgang von anderen Geräten, z. B. Betonfahrzeugen, und Arbeitern durchgeführt wird. Eine Unterscheidung der Aktivitäten anhand der Ausrüstungsdaten ist daher nur schwer möglich. Die Genauigkeit ist sehr gering. Werden jedoch Aktivitäten, an denen das Gerät aktiv beteiligt ist, betrachtet, z. B. beim „Ablassen“, „Lösen“ oder „Leeren“, so werden in allen Fällen zufriedenstellende Ergebnisse erzielt.

Abbildung 7-23c zeigt auch, dass die Aktivität „Bohren“ (LoD2) insgesamt aus vier LoD3-Aktivitäten („Ablassen“, „Lösen“, „Ziehen“ und „Leeren“) besteht. Daraus lässt schließen, dass die Genauigkeit der Vorhersage für andere Aktivitäten verbessert werden kann, indem Bezeichnungen für die Kategorien an die Möglichkeiten der Sensordaten angepasst werden, z. B. „Bewehrungskorb einbauen“, „Bewehrungskorb ziehen“ und „Bewehrungskorb ablassen“, an „Ziehen“ und „Ablassen“ beim Bohren. Die Ursache dieser Probleme liegt darin, dass die Möglichkeiten der Sensordaten, d. h. die aufgezeichneten Bewegungen der Geräte, bei der Auswahl der Kategorien für die Aktivitäten nicht berücksichtigt wurde. Stattdessen werden Teilprozesse und Vorgänge betrachtet. Infolgedessen werden unterschiedliche Aktivitäten in Fällen vergeben, in denen die Geräte keine unterschiedlichen Verhaltensweisen

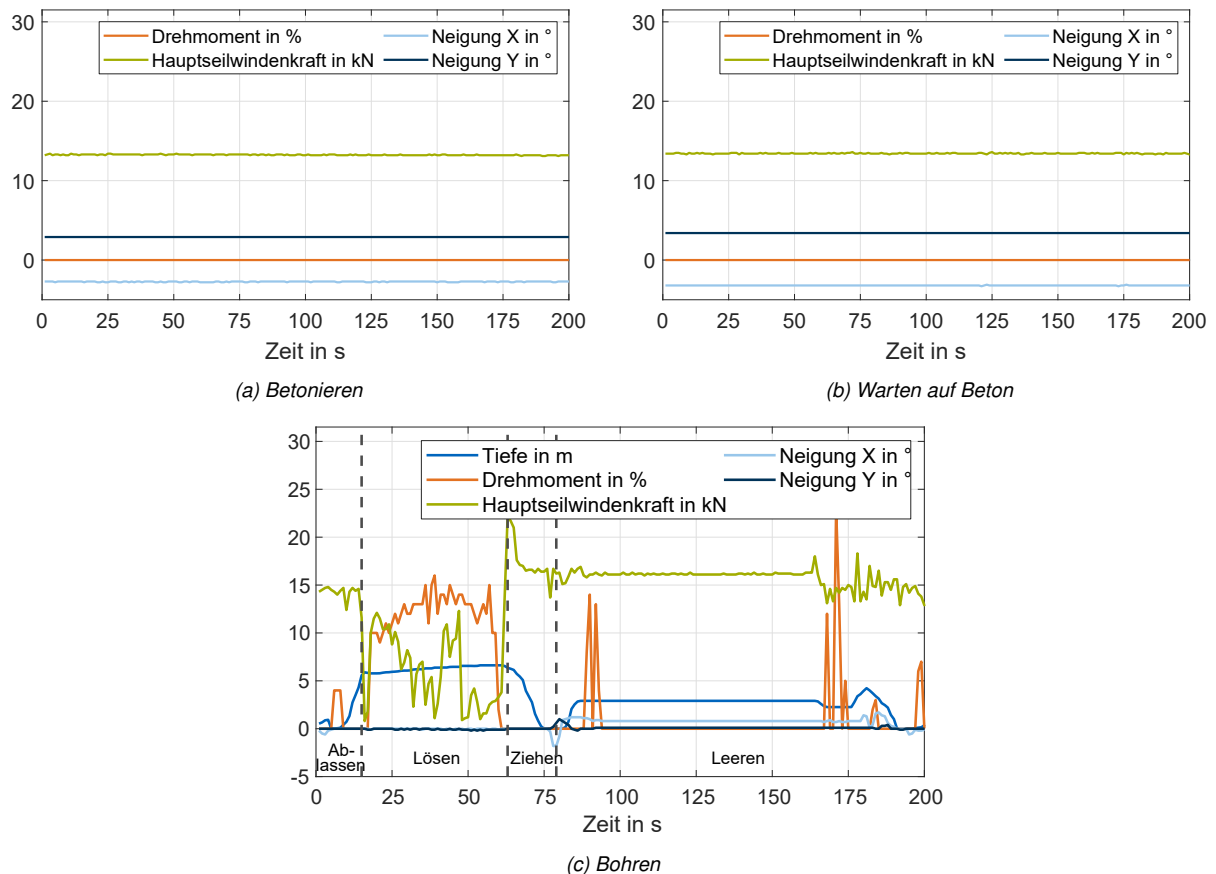


Abbildung 7-23: Rohdaten des Bohrgeräts für verschiedene Aktivitäten: (a) „Betonieren“, (b) „Warten auf Beton“ und (c) „Bohren“ (eigene Darstellungen nach [Fis-2023a])

aufweisen. Die Definition der Aktivitäten ist entscheidend für die Genauigkeit der Modelle. Sie muss sich auf das grundsätzliche Geräteverhalten beziehen. Können entscheidende Vorgänge auf diese Weise nicht abgebildet werden, so sollte auf alternative digitale Technologien zur Datensammlung, z. B. Kamerasysteme, zurückgegriffen werden.

7.5.5 Diskussion

Die vorhergehenden Abschnitte 7.5.2 und 7.5.3 zeigen vier Erkenntnisse:

1. ML-Modelle eignen sich zur automatisierten Aktivitätserkennung;
2. DL-Modelle mit LSTM-Schichten, die zu den RNN-Modellen zählen, berücksichtigen zusätzlich zeitliche Abhängigkeiten bei der Modellierung, was für die vorliegenden Sensordaten geeignet ist;
3. Die Kombination mit CNN ermöglicht eine automatisierte Verarbeitung der Sensordaten, d. h. Glättung von Rauschen, Filterung von Ausreißern, Merkmalsextraktion und -auswahl entfallen;
4. Bei der Auswahl der Aktivitäten für die automatisierte Aktivitätserkennung müssen die Bewegungsmuster des Bohrgeräts abgebildet werden. Nebenprozesse, ohne Bezug

auf das Bohrgerät, z. B. das Warten auf Beton, kann mit dieser Methode nicht abgebildet werden. Es empfiehlt sich daher, eine hierarchische Klassifizierung der Aktivitäten bezogen auf das Bohrgerät in die drei LoDs: (1) Arbeit und Leerlauf, (2) Prozessebene und (3) Bewegung.

Letzteres stellt gleichzeitig auch die Limitation der Klassifikationsstudien dar. Die gegebenen prozessbezogenen Aktivitätsdaten erschweren die Klassifikation auf Basis der Sensordaten. Des Weiteren kann eine Generalisierbarkeit der Modelle auf weitere Spezialtiefbauprojekte aufgrund der vorliegenden Besonderheiten des Spezialtiefbauprojekts nicht gewährleistet werden.

7.6 Datenübertragung

7.6.1 Überblick

Für die Datenübertragung zwischen Bohrgerät und Simulationssoftware wird eigens eine Middleware entwickelt und implementiert (siehe Abbildung 7-24). Sie vermittelt die Daten interoperabel zwischen den verschiedenen Anwendungen. D. h. Ziel der Implementierung für das Anwendungsbeispiel ist die Anbindung des Bohrgeräts an die Aktivitätserkennung zur Weiterleitung der tatsächlichen Produktionszeiten in die Simulation.

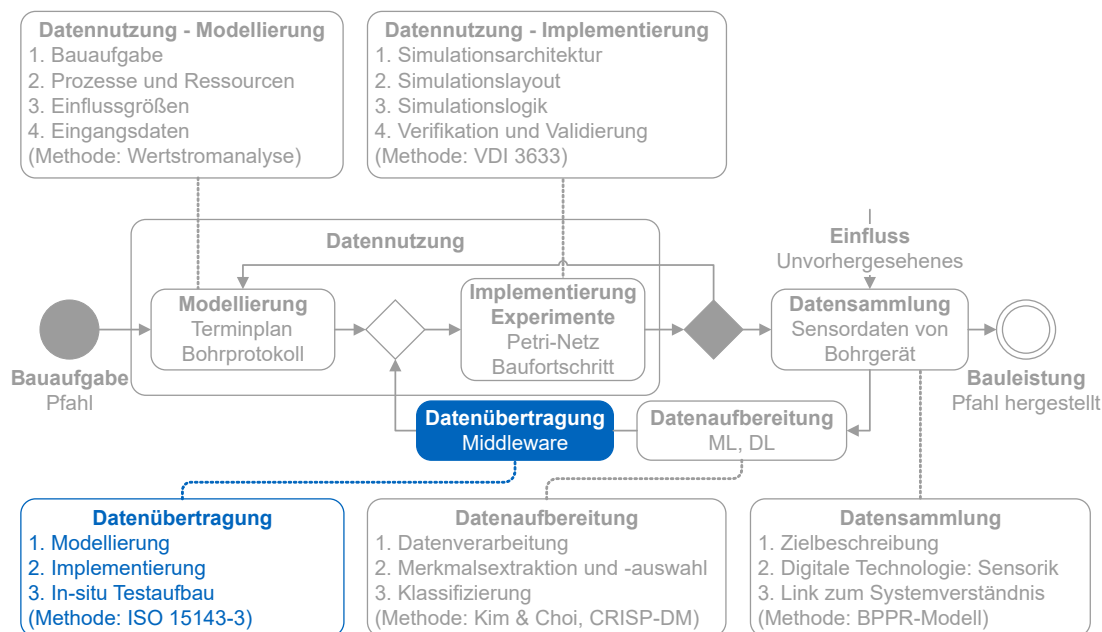


Abbildung 7-24: Baustein für die Datenübertragung am Digitalen Zwilling im Spezialtiefbau (blau; eigene Darstellung)

Die Architektur der Mikrodienste ist ein beliebtes Gestaltungskonzept beim Entwurf verteilter Computersysteme. Jeder Mikrodienst ist dabei für die Ausführung einer bestimmten Funktion verantwortlich. In einem typischen verteilten System ist z. B. ein Mikrodienst für das Lesen

und Schreiben einer Datenbank verantwortlich, ein anderer für den Datenaustausch zwischen anderen verteilten Systemen. Der Hauptvorteil dieses Gestaltungskonzepts besteht darin, dass jeder Mikrodienst in sich geschlossen und selbstorganisierend ist. Das bedeutet, dass Änderungen und Aktualisierungen der Mikrodienste sehr einfach durchzuführen sind und keine Störungen in anderen (nicht verwandten) Teilen des Systems verursachen.

Zu den drei Anwendungen in diesem Anwendungsbeispiel zählen:

1. die proprietäre Plattform des Geräteherstellers [BAU-2024b] als Flottenmanagementsystem,
2. die Anwendung zur Datenverarbeitung mit Hilfe der Aktivitätserkennung und
3. die verwendete Simulationssoftware Plant Simulation.

Aufgabe der Middleware ist es, den Zugang zwischen diesen Anwendungen zu kontrollieren und zu ermöglichen, d. h. die Weiterleitung, Formatierung und Übersetzung einer Anfrage von einer Anwendung zur Zielanwendung.

7.6.2 Modellierung

Die Middleware-Architektur ist in Abbildung 7-25 dargestellt.

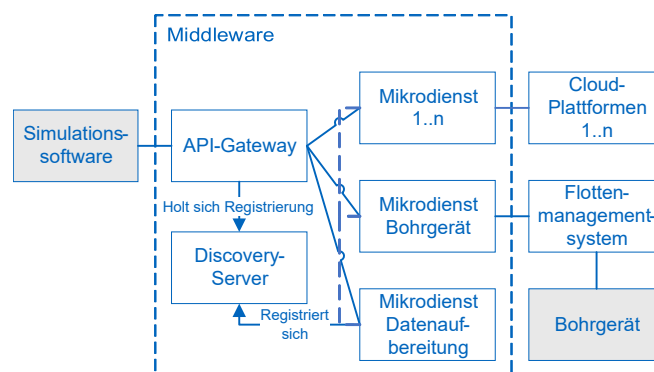


Abbildung 7-25: Architekturdiagramm der implementierten Middleware (in Grau: Außerhalb liegende Anwendung bzw. Datenquelle) (eigene Darstellung nach [Fis-2023b; fml-2020g; fml-2022])

Die Middleware besteht im Wesentlichen aus zwei Komponenten: (1) API-Gateway und (2) Discovery-Server. Sie ermöglichen die Kommunikation zwischen den Nutzenden (engl. Client) über die Simulation und den Ausführungseinheiten, den sogenannten Mikrodiensten (engl. Microservices), über vordefinierte Protokolle.

Kommunikationsprotokolle Die Middleware verwendet HTTP für die interne und externe Kommunikation zwischen den Mikrodiensten wie einer Software oder einer Plattform über REST-Anfragen (siehe Abbildung 7-26). Die Kommunikation mit den Nutzenden wird entweder über HTTP oder TCP abgewickelt.

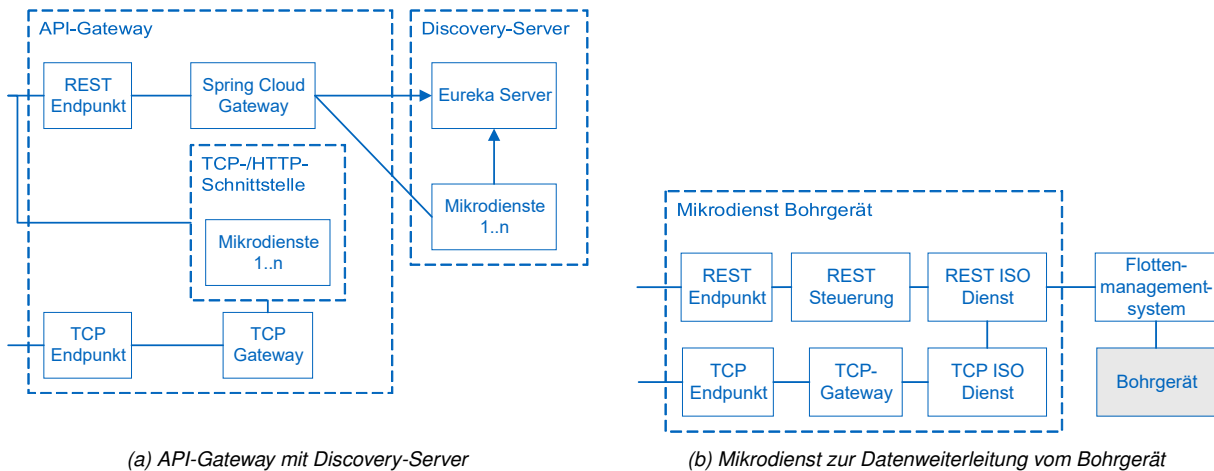


Abbildung 7-26: Komponenten der Middleware (grau: außerhalb liegende Anwendung bzw. Datenquelle; eigene Darstellung nach [fml-2022])

API-Gateway Das API-Gateway ist der einzige Zugangspunkt und Interaktion vom Nutzen zur Middleware. Es bietet zwei Standard-APIs, eine REST-API und eine TCP-basierte API. Diese APIs sind mit den Mikrodiensten verbunden, um bei Bedarf die Daten der verschiedenen Anwendungen abzurufen. Darüber hinaus kann es zwischen TCP- und HTTP-Nachrichten bei Anfragen und Antworten übersetzen.

Discovery-Server Das API-Gateway benötigt den Discovery-Server. Er ist zuständig für die Erfassung aller Mikrodienste. Wird ein neuer Mikrodienst im System integriert, erkennt der Discovery-Server automatisch die Schnittstelle und stellt die Verbindung her. Für die Implementierung wird auf die beiden Dienste von Spring, Eureka Service Registry und Eureka Discovery Clients, zurückgegriffen.

Mikrodienste Die Middleware umfasst mehrere Mikrodienste, die für die Kommunikation mit dem Flottenmanagementsystem zuständig sind. Ihre Aufgabe ist es, die verschiedenen Arten von Daten von den verschiedenen Quellen in ein einheitliches Format zu bringen, d. h. die Unterschiede in der Authentifizierung, den Kommunikationsformaten oder vor den Benutzenden zu verbergen, z. B. entfällt die Anmeldung auf der proprietären Plattform.

7.6.3 Implementierung

Die Implementierung der Middleware erfolgte in Java 11 unter Verwendung des Spring Boot Frameworks von VMware Tanzu und Apache Maven als Build-Management-Tool auf einem Ubuntu-System. Die Verifikation der Middleware erfolgte mit Hilfe der API Postman.

Es wird die Simulationssoftware Plant Simulation für das Simulationsmodell genutzt. Die Modellierung orientierte sich am Datenaustausch über ein Netzwerk-Socket [Sie-2019]. Es umfasst ein Client-Socket-Objekt, um eine TCP-Verbindung zur Middleware (Server-Socket) zu ermöglichen. Weiter gibt es ein Methoden-Objekt, um die Art und Weise des Nachrichtenversands zu programmieren. String-Variablen geben die angeforderten und gesendeten TCP-Nachrichten als Text zurück.

7.6.4 Testaufbau

Die Validierung der Middleware erfolgt anhand eines zweistufigen Testaufbaus. Der erste Testaufbau dient dazu, die standardisierte Datenübertragung über die ISO-Norm 15143-3 [ISO-15143-3] zu testen. Im zweiten Testaufbau sollte die direkte Datenverarbeitung und -übertragung vom Bohrgerät in die Simulation getestet werden.

Der Mikrodienst *Bauer* verbindet sich mit dem proprietären Flottenmanagementsystem des Geräteherstellers. Diese Plattform empfängt und speichert Daten des Bohrgeräts. Die Abfragen folgen der ISO-Norm 15143-3.

Abbildung 7-26 zeigt die Komponenten und die Einbindung des Mikrodienstes *Bauer*: (1) Anfragen werden über den TCP-Endpunkt an das TCP-Gateway und den TCP-ISO-Dienst gesendet; (2) diese Anfrage wird im REST-ISO-Dienst übersetzt; (3) von dort wird sie formatiert und an die REST-API von der Plattform des Geräteherstellers weitergeleitet.

Die im Rahmen der ISO-Norm 15143-3 geforderte Identifizierung nach OAuth 2.0 erfordert zunächst die Authentifizierungsanfrage. Bei erfolgreicher Authentifizierung wird ein Token von der Plattform an die Middleware übermittelt. Mit diesem Token ist schließlich die Abfrage der 20 Datenpunkte gemäß der ISO-Norm 15143-3 möglich. Im Test können auf diese Weise von einem virtuellen Bohrgerät u. a. Datenpunkte, wie letzter bekannter Standort, Betriebsstunden und kumulierter Kraftstoffverbrauch, übersendet werden.

Diese Daten enthalten jedoch nicht die Dauer der einzelnen Schritte des Bauprozesses. Für die Aktivitätserkennung aus Abschnitt 7.5 sind die Sensordaten des Bohrgeräts erforderlich, um die einzelnen Aktivitäten und daraus die Dauer abzuleiten. Diese Sensordaten können nicht an das proprietäre Flottenmanagementsystem gesendet werden. Folglich wird der implementierte Mikrodienst nicht für die Kommunikation benötigt.

Stattdessen wird auf dem Testgelände des Geräteherstellers ein einfacher bidirektionaler Datenaustausch über den Open-Source-Server FileZilla durchgeführt. FileZilla ermöglicht einen direkten TCP-Austausch, um sich über das WLAN des Bohrgeräts einzuwählen und die Daten direkt aus der Anwendung in einen lokalen Ordner zu übertragen (siehe rechte Seite in Abbildung 7-26). Das DeepConvBiLSTM-Modell interpretiert die Daten und überträgt sie an die Simulationssoftware Plant Simulation.

7.6.5 Diskussion

Die eigens entwickelte und implementierte Middleware ermöglicht die automatisierte Datenübertragung zwischen der proprietären Plattform des Geräteherstellers und der Simulationssoftware.

Einschränkungen ergeben sich durch eine fehlende Hersteller-API. Der Datenaustausch beschränkte sich auf die Schnittstelle zur ISO-Norm 15143-3 [ISO-15143-3]. Die Aktivitätserkennung erfordert stattdessen die Bereitstellung der Sensordaten. Eine durchgängige automatisierte Datenübertragung, -aufbereitung und damit auch -nutzung in der Simulation konnte somit nur testweise virtuell validiert werden.

Die vorgestellte Middleware wird daher nicht auf ihre Praxistauglichkeit hin untersucht. Weitere Studien sind erforderlich, um die Optimierung der Leistung beim Datenaustausch, die Sicherheitsaspekte sowie die Systembandbreite und die Konnektivität vor Ort zu untersuchen, wofür eine entsprechende Hersteller-API zur Verfügung gestellt werden muss.

Die Middleware kann für weitere Anwendungen erweitert werden. Die Anbindung von weiteren Geräten (anderer Hersteller), z. B. von Verdichtungsgeräten [Sch-2025], oder Materialien, erfasst durch TaT-Technologie und deren zugehörigen Plattformen [Cai-2022], sind denkbar. Diese Anbindungen ermöglichen die Nutzung verschiedener Datenquellen und damit mehr Daten. Davon profitiert die Aktivitätserkennung, die durch Datenfusion die Wahrscheinlichkeit ihrer Vorhersagen festigen und verbessern kann [She-2019]. Außerdem können bis dato nicht erfasste Bauprozesse erfasst werden, z. B. das Warten auf Beton. Die Simulation hat damit eine höhere Aussagekraft, was die Entscheidungsunterstützung letztlich positiv beeinflusst.

Die Nutzung der Middleware ist außerdem auch für andere Anwendungsbeispiele denkbar, z. B. im Hochbau für die Integration der tatsächlichen Lieferdaten in die Simulation (siehe Abschnitt 6). Insgesamt kann eine automatisierte und damit aufwandsarme Nutzung der Daten in die Simulation erfolgen.

7.7 Experiment

Als abschließende Simulationsstudie für den Digitalen Zwilling wird im Folgenden der Einfluss von aktuellen Produktionszeiten auf die Qualität der Baufortschrittsvorhersage gezeigt. Das Experiment folgt auf die Modellierung und Implementierung eines einfachen Petri-Netzes für die Simulationsstudie (siehe Abschnitt 7.2 und 7.3). Diese Simulationsstudie in Zusammenhang mit dem BPPR-Modell zur Datensammlung und der Aktivitätserkennung zur Datenaufbereitung wurde in [Fis-2020; Fis-2023a] bereits veröffentlicht.

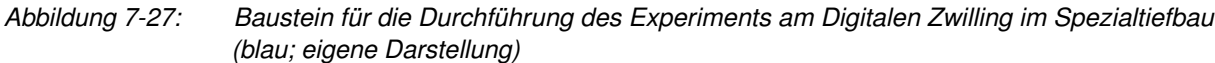


Abbildung 7-28 zeigt die Verteilungen für die erwartete Bauzeit für die drei betrachteten Datenmengen sowie die tatsächliche Dauer der Pfahlproduktion (gestrichelte Linie).

Auch in Abhängigkeit der Pfahlreihenfolge werden diese Ergebnisse widerspiegelt (siehe Abbildung 7-29). Mit steigender Pfahlnummer nähern sich die Kurven der Vorhersage (grün) den Ist-Daten (blau) an.

177

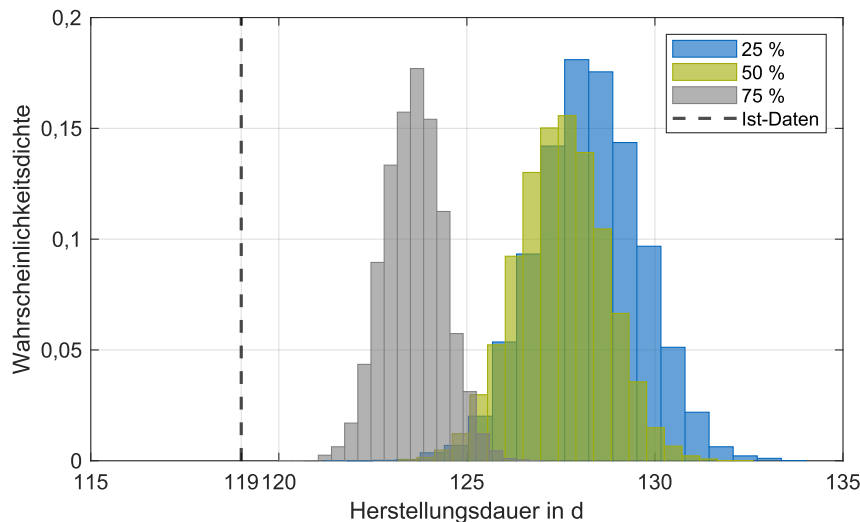


Abbildung 7-28: Ergebnisse der Simulationsläufe: Die Vorhersagen für die Bauzeit nähern sich der tatsächlichen Dauer von 119 Tagen an, je mehr Pfähle produziert werden (eigene Darstellung nach [Fis-2023a])

Tabelle 7-13: Ergebnisse der Simulationsstudie im Vergleich zur tatsächlichen Herstellungsdauer für die Bohrpfähle des Spezialtiefbauprojekts (eigene Darstellung nach [Fis-2023a])

Projektdauer	Vorhersage der gesamten Produktionsdauer	
Anteil Ist-Daten	Mittelwert	Standardabweichung
25 %	128,2 d (9,2 d bzw. 7,8 %)	1,4 d
50 %	127,5 d (8,5 d bzw. 7,1 %)	1,2 d
75 %	123,6 d (4,6 d bzw. 3,9 %)	0,8 d
100 %	119,0 d	–

Aktualisierung der Daten ab. Die Standardabweichung um den Mittelwert des vorhergesagten Wertes verringert sich von etwas mehr als einem Tag (1,4 d bei 25 % und 1,2 d bei 50 % Baufortschritt) auf weniger als einen Tag (0,8 d bei 75 % Baufortschritt).

7.8 Diskussion

Durch die Durchführung mehrerer Simulationsläufe sowie die Erhöhung der Informationsdichte mit zunehmendem Baufortschritt wird die Wahrscheinlichkeit für eine gute Vorhersage der Herstellungszeit von mehr als einer Woche (9,2 d bei 25 % Baufortschritt) auf wenige Tage (4,6 d bei 75 % Baufortschritt) erhöht. Insgesamt überschätzt die Simulation die Ergebnisse. Das kann zwei Gründe haben: (1) Produktivitätssteigerung mit der Zeit und (2) Einfluss der produzierten Pfahllängen.

Ersteres bezieht sich auf die Lernkurve des Teams, die im vorliegenden Fall nicht berücksichtigt wird. Wie in Abschnitt 7.2.3 beschrieben, geht aus den Interviews mit den Expert*innen

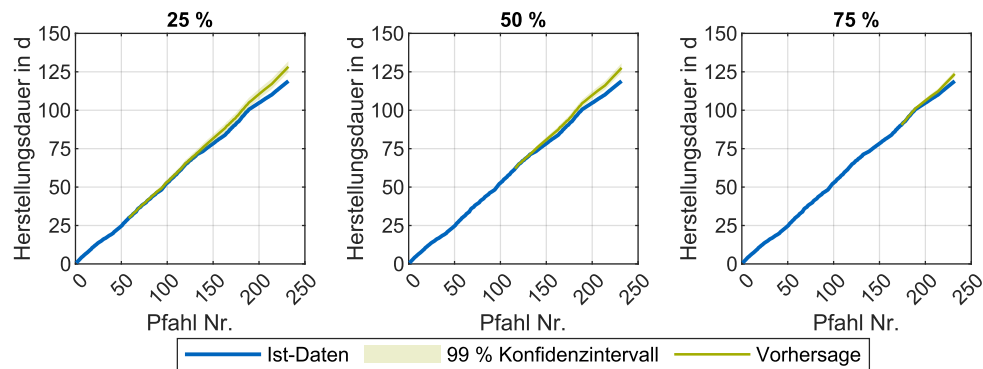


Abbildung 7-29: Kumulative Dauer der Pfahlproduktion während des Spezialtiefbauprojekts: Ist-Zustand (blau) im Vergleich zur Vorhersage der Simulationsläufe (grün) auf der Grundlage von (a) 25 %, (b) 50 % und (c) 75 % Ist-Zustand (eigene Darstellung nach [Fis-2023a])

eine Minstdauer von ca. einer Woche hervor, um ein Team zusammenzustellen. Je eingespielter das Team, desto größer ist die Produktivität, z. B. bei der Reduzierung des Aufbaus der Anlage.

Zweiteres bezieht sich auf die Verteilung der einzelnen Pfahllängen über das Spezialtiefbauprojekt. Im vorliegenden Anwendungsbeispiel folgt die Anordnung der Pfahllängen keiner Ordnung (siehe Abbildung 7-30a). Wären die Pfahllängen hingegen aufsteigend sortiert, wäre der Zeitaufwand für die ersten 25 % der Pfähle deutlich geringer als für die letzten 25 % (siehe Abbildung 7-30b). Infolge dessen würde die Simulation die Produktionszeit unterschätzen, da die Eingangsdaten auf kürzeren Pfählen basieren würde.

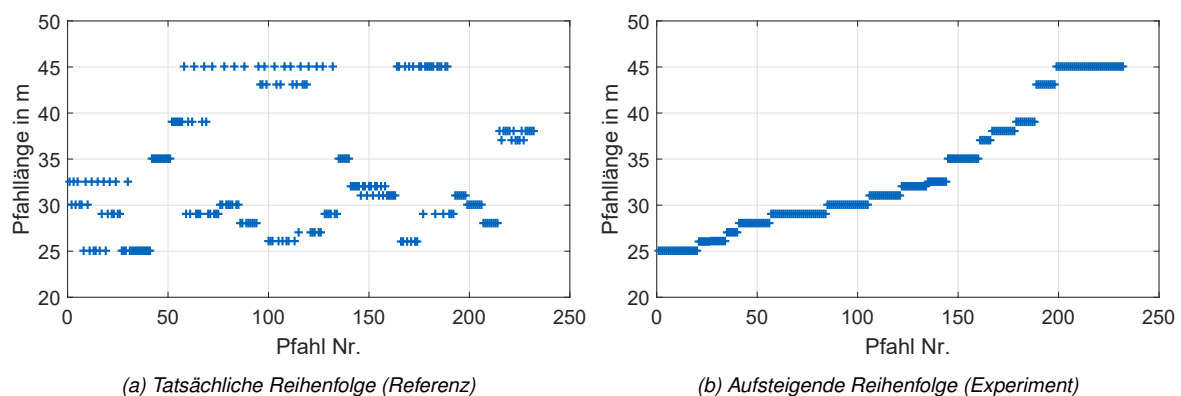


Abbildung 7-30: Reihenfolge der Herstellung der Pfähle in Bezug auf ihre Länge (eigene Darstellungen nach [Fis-2023a])

Das Anwendungsbeispiel zeigt auch die enge Wechselwirkung zwischen digitalen Technologien und deren Anwendungen im Prozess auf. Der Spezialtiefbau ist ein wettbewerbsintensiver Bereich, der stark von Produkt- und Prozesswissen geprägt ist, welches grundlegend für die geeignete Anwendung und Nutzung der Digitalen Zwillinge ist.

Die Studie zur hierarchischen Klassifizierung der Aktivitätserkennung verdeutlicht diese Wechselwirkung durch den Konflikt zwischen der Granularität der Trainings- und der Testdaten. Die einschlägige Literatur hat gezeigt, dass die Genauigkeit der ML-Modelle mit

zunehmender Granularität der Aktivitäten abnimmt. Sie schlussfolgert daraus, dass die Kenntnisse über das Produktionssystem selbst unzureichend sind. Auch in dieser Arbeit sind die Ergebnisse nicht zufriedenstellend. Sie zeigen, dass sich die Granularität der Aktivitätsbeschreibung auf die Bewegungen der Ausrüstung beziehen muss, was die Voraussetzung für ein tiefes Verständnis des Produktionssystems ist. Aktivitäten, an denen das Bohrgerät nicht aktiv beteiligt ist, können nicht ausreichend unterschieden werden, z. B. das Betonieren gegenüber dem Warten auf Beton. Eine mögliche technische Erweiterung wäre die Fusion von Sensor- und Bilddaten oder die Berücksichtigung von Regeln für Zustandsübergänge bei bestimmten Aktivitäten, um die Einschränkungen zu überwinden, die bei Aktivitäten auftreten, bei denen die Ausrüstung nicht ständig in den Produktionsprozess eingebunden ist.

Die beiden Komponenten des Digitalen Zwillings, die Aktivitätserkennung und die Simulation, dienen unterschiedlichen Zwecken: Während die Aktivitätserkennung Sensordaten analysiert, was Bewegungsschritte des Geräts erfordert, analysiert die Simulation die Leistung, was wertschöpfende und nicht-wertschöpfende Teilprozesse erfordert. Obwohl diese Komponenten spezifische Anforderungen haben, verfolgen sie den gleichen Zweck: Den Produktionsfluss zuverlässig abzubilden. Diese Zuverlässigkeit beruht darauf, dass die Produktionsprozesse für die Modelle sichtbar und nachvollziehbar gemacht werden.

Die implementierte Simulation basiert auf einem einfachen Petri-Netz ohne die detaillierte Abbildung von Materialflüssen. Damit kann keine umfassende Aussage über den Einfluss der Baulogistik auf das Produktionssystem getroffen werden, z. B. hinsichtlich der verwendeten Ressourcen, wie der Anzahl und Kapazität der zur Entsorgung des gelösten Bodens oder zur Anlieferung des Bewehrungskorbs oder Betons eingesetzten THMs, oder hinsichtlich der nicht-wertschöpfenden Prozessschritte, wie dem Werkzeugwechsel oder dem Eindrehen von Verrohrungen. Ein detaillierteres Modell ist erforderlich, um diese Prozesse zu hinterfragen, einschließlich Material, Ausrüstung oder Arbeitsschichten, sowie um verschiedene Auswirkungen der Baulogistik auf die Optimierung des Produktionssystems zu untersuchen.

Insgesamt betrachtet das Anwendungsbeispiel alle Bausteine des Vorgehensmodells. Die Datensammlung basiert auf der Verwendung von bereits klassifizierten Sensordaten. Die Datenaufbereitung zeigt eine umfassende Studie zur Auswahl und Optimierung von ML-Modellen zur automatisierten Klassifizierung und Erkennung von Aktivitäten aus den Daten. Eine eigens entwickelte Middleware dient der Datenübertragung in die Simulation. Die Simulation selbst ermöglicht die Baufortschrittsvorhersage. Gegenüber den ersten beiden Anwendungsbeispielen bildet das Simulationsmodell das Produktionssystem in einem stark vereinfachten Petri-Netz ab. Fragestellungen der Baulogistik werden dadurch nur sehr eingeschränkt über die Bearbeitungszeiten von Nebenprozessen betrachtet. Insbesondere die Untersuchungen zur hierarchischen Klassifizierung der Aktivitäten zeigen die starken Zusammenhänge von Technologie- und Systemkenntnissen, was über das BPPR-Modell innerhalb des Vorgehensmodells abgedeckt wird.

8 Diskussion

8.1 Vergleich der Anwendungsbeispiele

Der vorgestellte Lösungsansatz für simulationsgestützte Digitale Zwillinge in der Baublogistik wurde anhand von drei Anwendungsbeispielen in drei verschiedenen Baubereichen umgesetzt und bewertet: (1) Modulbau, (2) Innenausbau im Hochbau, (3) Spezialtiefbau.

Die drei Anwendungsbeispiele stellen dabei drei verschiedene Bauproduktionssysteme dar (Produkt, Prozess, Ressource, Methode) mit unterschiedlichen Einflüssen und eingesetzter digitaler Technologie (siehe Tabelle 8-1).

Tabelle 8-1: Vergleich der Anwendungsbeispiele hinsichtlich ihrer Bauproduktionssysteme, Einflüsse und eingesetzter digitaler Technologie für den Digitalen Zwilling (DS: Datensammlung; DA: Datenaufbereitung; DÜ: Datenübertragung; DN: Datennutzung; eigene Darstellung nach [Mos-2016])

Merkmale	Modulbau	Hochbau	Spezialtiefbau
Produkt	Modul	Raum	Pfahl
Prozess	• Serienfertigung • Hoher Automatisierungsgrad • Stationär • Prozessschritte sind wiederkehrend und daher auch schnell von unqualifiziertem Personal erlernbar • Schichtarbeit	• Einzelanfertigung • Gewerkeintensiv • Wechselnde Produktionsorte • Arbeitskraft kann unterschiedlich eingeteilt werden • Prozessschritte werden von Gewerken ausgeführt • Gewerkebetriebe unterscheiden sich je Bauprojekt	• Einzel-/Serienfertigung • Geräteintensiv • Wechselnde Produktionsorte • Eingeschränkte Verteilungsmöglichkeiten der Arbeitsaufwände • Prozessschritte werden von einer Gruppe pro Spezialgerät durchgeführt (Lernkurve)
Ressource	• Produktionsanlage • Gruppengröße kann variieren (bindend an Anlage)	• Fachkräfte verschiedener Gewerke, horizontale und vertikale THMs (z. B. Krane, Aufzüge, Stapler, Hubwagen) • Anzahl der Gruppengrößen variabel	• Spezialgeräte (Bohrgerät), Hilfsgeräte (Kran, Radlader, Bagger) • Fixe Gruppengröße (beschränkt durch Gerätegröße und dessen Arbeitsraum)
Methode	• Push-Prinzip (Produktion der Bauteile) • Pull-Prinzip (Zusammenbau zum Modul)	• JIT-Anlieferung • Kitting	• Spezielles Produktionsverfahren (Kellybohrverfahren)
Einfluss	• Grad der Individualisierung der Kund*innen • Schnittstellen zwischen den Produktionslinien • Fluss-Zielgröße: Kontinuierliche Montagelinie	• Koordinationsaufwand zwischen den verschiedenen Gewerken und geteilten Ressourcen • Fluss-Zielgröße: Versorgung des Gewerkezugs	• Umwelteinfluss durch Unvorhersehbares, z. B. Witterung oder Geologie • Fluss-Zielgröße: Hohe Geräteauslastung
Digitale Technologie	1. DS: RFID 2. DN: Simulation	1. DS: Avisierung 2. DN: Simulation	1. DS: Sensorik 2. DA: KI 3. DÜ: Middleware 4. DN: Simulation

Der **Modulbau** im Anwendungsbeispiel 1 ist der stationären Fertigung in der Industrie sehr ähnlich. Fest installierte Anlagen, größtenteils verbunden durch Förderanlage, führen zu einem kontinuierlichen Produktionsfluss. Der Zusammenbau des eigentlichen Produkts, dem Modul, aus verschiedenen Bauteilen ist wiederum stark abhängig von deren Bereitstellung. Diese Bereitstellung erfolgt in mobilen Pufferstationen. Sie sind gleichzeitig auch der Engpass der Produktion. Einflussgrößen, wie der Mensch oder die Umwelt, sind, aufgrund des hohen Standardisierungsgrads, d. h. gleiche Aufgaben und Bedingungen, weniger relevant. Die Steuerung der Produktionsanlage erfolgt über einen vorgegeben Takt nach dem Push- und Pull-Prinzip für die Herstellung der Bauteile und dem Zusammenbau der Module. Für die Datensammlung von Bearbeitungszeiten einzelner Bauteile wurde RFID als TaT-System im Anwendungsbeispiel verwendet. Die Simulation diente der virtuellen Systemanalyse und -verbesserung.

Ein geringer Standardisierungsgrad liegt im **Hochbau** und dessen Innenausbau für das Anwendungsbeispiel 2 vor. Ziel ist die Fertigstellung von Räumen. Die Aufgaben sind aufgrund der sich möglichst wiederholenden Regelgeschosse ähnlich. Die Herausforderung ist die Koordination der stark segmentierten und fragmentierten Gewerke. Die Baulogistik unterstützt dabei, den Fokus der Gewerke auf ihre wertschöpfenden Tätigkeiten zu legen. Entscheidend ist dabei eine stringente Koordination der JIT-Materiallieferungen. Dazu lag in einem der Hochbauprojekte Ist-Daten einer Avisierungssoftware vor. Die Simulation wurde zur Überprüfung einer alternativen Kitting-Anlieferstrategie genutzt.

Der **Spezialtiefbau** Anwendungsbeispiel 3 ist ebenfalls abhängig von der hohen Spezialisierung der Facharbeitenden. Die Produktionsleistung wird an den fertiggestellten Tiefgründungen gemessen. Durch die hohe Abhängigkeit von Umwelteinflüssen ähnelt die Herstellung einer Einzelfertigung. Die Abhängigkeit ist damit nur vermeintlich vom produzierenden Baugerät, dem Bohrgerät und dessen hoher Auslastung, gegeben. Verzögerungen ergeben sich auch hier durch die Schnittstellen zu Ressourcenlieferungen wie Beton. Im Anwendungsbeispiel konnten die Ist-Daten von Sensorsystemen eines Bohrgeräts gesammelt und mit Hilfe von KI aufbereitet werden. Die Datenübertragung sollte über eine Middleware realisiert werden. Die Simulation diente dazu den Mehrwert dieser Ist-Daten für eine verbesserte Baufortschrittsvorhersage aufzuzeigen.

Auf Basis dieser Voraussetzungen wurden in den drei Anwendungsbeispielen das entwickelte Vorgehensmodell für Digitale Zwillinge angewendet. Im Folgenden wird daher die Umsetzung und Bewertung der einzelnen Bausteine des Vorgehensmodells aufgezeigt (siehe Tabelle 8-2).

Datensammlung

Im Anwendungsbeispiel 1 (Modulbau) sollte die Bearbeitungsdauer für die Doppelwand mit Hilfe von RFID erfasst werden. Diese Bearbeitungsdauer ist wesentlich für eine rechtzeitige

Tabelle 8-2: Vergleich der drei Anwendungsbeispiele als Digitale Zwillinge für die Baulogistik (eigene Darstellung)

Kriterium	Modulbau	Hochbau	Spezialtiefbau
Bauphase	Planung, Fertigung	Planung, Ausführung	Planung, Ausführung
Einordnung	Produktions(-logistik), Informationslogistik	Produktionslogistik, Informationslogistik	Produktions(-logistik), Informationslogistik
Optimierungsziel	Erhöhung der Auslastung, Reduktion der Lagerbestände und Bearbeitungszeiten	Anlieferstrategien für die Materialversorgung der Taktbereiche	Baufortschrittsvorhersage zur Verbesserung der Schnittstelle zur Materialversorgung
Datensammlung	RFID-Versuchsaufbau (Bearbeitungszeiten)	Avisierungssoftware (Materialanlieferung)	Sensordaten (Aktivitäten Bohrgerät)
Datenaufbereitung	–	Tabelle (manuell)	ML (teilautomatisiert), DL (automatisiert)
Datenübertragung	–	–	Middleware (dynamisch, täglich)
Datennutzung	Constraint-basierte Simulation	(Modulare) constraint-basierte Simulation	Petri-Netz, Monte-Carlo-Simulation
Fazit	• Empfehlungen für verbesserten RFID-Versuchsaufbau • Beantwortung logistischer Fragestellungen für Modulbauanlage • Nachweis für Mehrwert von Standardisierung für das Systemverständnis	• Modulares Simulationsmodell für Regelgeschosse • Erfolgreicher Test einer Avisierungssoftware zur Datensammlung • Überprüfung der Ist-Daten durch Anlieferstrategien in Simulationsexperimenten	• Erstmalige Nutzung von intern verbauten Sensorsystemen • Eignung von ML zur automatisierten Aktivitätserkennung • Eigenentwicklung einer Middleware zur Datenübertragung • Nachweis für Mehrwert von Ist-Daten durch Simulation
Limitationen	• Unzureichende Datensammlung aus RFID-Versuchen • Keine Dateneinbindung in die Simulation	• Eingeschränkte Nutzung des modularen Simulationsmodells bei erhöhter Dynamik • Manuelle Datenaufbereitung • Keine Dateneinbindung in die Simulation	• Unzureichende Beschreibung der Aktivitätsdaten • Einbindung von Daten unter Laborbedingungen • Keine Simulation von Materialflüssen

Bereitstellung des Bauteils auf der Modulbauanlage. Durch die Bereitstellung der tatsächlichen Bearbeitungsdauern in der Simulation hätten die produktionstechnischen Auswirkungen aufgezeigt werden können. Letztlich hat sich gezeigt, dass der Versuchsaufbau nicht ausgereift genug war. Die RFID-Tags mussten manuell angebracht und entfernt werden, sobald das Bauteil in die Station eintrat bzw. diese wieder verließ. Die gesammelten Daten lagen in einer unzureichenden Datenmenge und -qualität zum Versuchsende vor. Eine Datennutzung in der Simulation war zwar nicht möglich, allerdings konnten entscheidende Verbesserungen für die zukünftige Datensammlung aufgezeigt werden, z. B. durch die permanente Anbringung der RFID-Tags und der Antenne an der Station und dem Portalkran.

Im Anwendungsbeispiel 2 (Hochbau) wurden die Daten zur Materialanlieferung mit Hilfe einer Avisierungssoftware des Industriepartners eingeholt. Ursprünglich wurde die Avisierung zur Koordination und Abrechnung der Baulogistik genutzt. Für dieses Anwendungsbeispiel wurden die Daten für die Beurteilung der Umsetzung der Anlieferstrategie gesammelt. Die Avisierung ist eine rein manuelle Anwendung für die Anmeldung der Materialbestellungen eines jeden Gewerks. Die Qualität der Daten ist daher von verschiedenen Beteiligten abhän-

gig, wodurch Verluste entstehen. Standardisierungsbestrebungen bauleistungslogistischer Prozesse oder Größen wie die Schnittstelle zum Einkauf der Gewerke oder die Festlegung von TE bestim�ter Materialien würden den Aufwand reduzieren.

Auch im Anwendungsbeispiel 3 (Spezialtiefbau) bestätigte sich, dass die Datensammlung entscheidend für die Aussagekraft der späteren Simulation ist. Ein Vorteil liegt in der Nutzung von Daten, die bereits durch vorhandene Sensoren an den Geräten selbst erfasst werden. Entscheidend für die nachfolgende Datenaufbereitung dieser Sensordaten mit Hilfe von überwachtem ML ist die geeignete Definition der zu erkennenden Aktivitäten. Diese müssen sich auf die Bewegungen des Gerätes beziehen. Für die Einführung von Assistenzsystemen ist eine granulare Aufschsselung sich wiederholender Aktivitäten notwendig, z. B. zur Unterstützung des Ablassens des Bohrwerkzeugs. Für die Optimierung des Bauprozesses reicht diese gertezentrierte Betrachtung nicht aus. Vielmehr müssen auch die Schnittstellen zu logistischen Ressourcen abgedeckt werden, z. B. zu Fahrmischern für die Erfassung von Wartezeiten auf Beton.

Datenaufbereitung

Aufgrund der unzureichenden Daten im Anwendungsbeispiel 1 (Modulbau) wurde auf eine Datenaufbereitung verzichtet. Allerdings wäre auch hier eine manuelle Aufbereitung, wie im Anwendungsbeispiel 2 (Hochbau), möglich gewesen. Die Schwierigkeit in der Datenaufbereitung lag dabei im Abgleich und in der Überführung der Soll- und Ist-Daten. Materialien mussten teils neu hinzugefügt oder zusammengefasst werden. Erschwerend hinzu kam, dass kein aktualisierter Taktplan vorlag, sodass ein Abgleich der Änderungen im Bestellverhalten nicht mit der tatsächlichen Produktion abgeglichen werden konnte. Insgesamt zeigte sich, dass sowohl in der Planungs- als auch in der Ausführungsphase die Aufbereitung der Eingangsdaten zur Aktualisierung der Simulation einen großen Aufwand darstellt. Diese stark manuelle erfahrungsbasierte Aufbereitung ist fehleranfällig. Dennoch konnte eine Überschätzung der ursprünglich angenommenen Soll-Daten quantifiziert werden. Eine Einbindung dieser Daten in das Simulationsmodell hätte einen Einfluss auf die Baulegistik zur Folge gehabt. Korrekturen oder Anpassungen bei der Umsetzung der Anlieferstrategie hätten rechtzeitig angestoßen werden können.

Im Anwendungsbeispiel 3 (Spezialtiefbau) wurde aufgezeigt, dass die ML-Modelle für die Aktivitterkennung sehr gute Ergebnisse für die Aktivitäten für das produzierende Gerät lieferten. Insbesondere die Aktivitäten für den Teilprozess Bohren konnten sehr gut vorhergesagt werden. Gegenüber ML-Modellen bieten die DL-Modelle einen höheren Grad an automatisierter Aktivitterkennung ohne manuelle Datenverarbeitung an. Gleichzeitig verdeutlichen die Ergebnisse den Einfluss dieser fehlenden Datenverarbeitung. Hybride Modelle aus LSTM- und CNN-Schichten sind besonders geeignet, da sie die zeitliche Abhängigkeiten der Sensordaten berücksichtigen und Vorteile gegenüber einer aufwendigen

und fehleranfälligen manuellen Datenverarbeitung aufweisen. Untersuchungen hinsichtlich Verbesserungen der DL-Modelle durch eine hierarchische Klassifizierung zeigen die Sensibilität gegenüber den gesammelten Daten auf. Dabei muss die Datensammlung auf die Möglichkeiten der Datenaufbereitung eingehen. D. h. werden Daten von Sensorsystemen auf dem produzierenden Gerät gesammelt und sollen diese mit Hilfe von überwachtem Lernen automatisiert erkannt werden, dann müssen die zu klassifizierenden Aktivitäten auch das Verhalten dieses Geräts wiedergeben. Aktivitäten, bezogen auf die Baulogistik, konnten aus der vorliegenden Datensammlung nicht abgedeckt werden.

Datenübertragung

Die Datenübertragung wurde im Anwendungsbeispiel 3 (Spezialtiefbau) untersucht. Dazu wurde eine Middleware vorgestellt. Auf Basis einzelner Mikrodienste kann die Datensammlung, -aufbereitung und -weiterleitung in die Simulation koordiniert werden. Herausforderungen ergaben sich aus der Verknüpfung der dafür notwendigen unterschiedlichen Datenquellen. Für die Integration eines Digitalen Zwillings ist dieser zentrale automatisierte Lösungsansatz anzustreben, um den manuellen Aufwand mit dem Umgang der Daten möglichst gering zu halten. Perspektivisch bietet sich die Anbindung mehrerer Ressourcen an, um die relevanten Daten für die Baulogistik zu fusionieren.

Datennutzung

Die Datennutzung wurde durch den Einsatz der Simulation angestrebt. Das Anwendungsbeispiel 1 (Modulbau) ermöglichte eine einfache Übertragung der stationären Anwendung der Simulation auf ein Produkt der Bauindustrie. Die klar definierten Vorgänge unterstützen die Modellierung und Validierung der Simulation. Die Entkopplung innerhalb der Rohbaulinie und zwischen der Rohbau- und Montagelinie durch die gegebenen Puffer erhöhte die Redundanz. Einzig die Belegung des Portalkrans führte zu einer erhöhten Verkettung. Im Anwendungsbeispiel 2 (Hochbau) lag der Fokus auf einer modularen wiederverwendbaren Simulation, um dem Unikatcharakter entgegenzuwirken. Im Gegensatz zu den stationären Verhältnissen im Modulbau ist die Komplexität im Hochbau erhöht. Durch das Anfordern von THMs inkl. Personal liegt eine starke Verkettung innerhalb der Simulationslogik vor. Im Vergleich zu den ersten beiden Anwendungsbeispielen wurde im Anwendungsbeispiel 3 (Spezialtiefbau) mit dem Petri-Netz eine sehr einfache Form der Simulation umgesetzt. In Kombination mit einer Monte-Carlo-Simulation konnten aktualisierte Daten als Wahrscheinlichkeitsverteilung eingebunden werden, um eine verbesserte Vorhersage des Baufortschritts zu gewährleisten. Eine Erweiterung der Simulation für die Abbildung von Materialflüsse ist sinnvoll, um Maßnahmen für die Baulogistik ableiten zu können wie im Anwendungsbeispiel 1 für den Ressourceneinsatz oder im Anwendungsbeispiel 2 für verschiedene Anlieferstrategien eindrücklich gezeigt wurde.

Letztlich konnte in allen drei Anwendungsbeispielen gezeigt werden, dass die Nutzung von Daten für die Simulation im Bereich der Baulogistik von Vorteil ist. Das vorgestellte Vorgehensmodell zeigt Lösungswege auf, um diese Datennutzung in der Simulation als Digitalen Zwilling zu entwickeln und in die Baupraxis zu integrieren.

8.2 Bewertung des Vorgehensmodells anhand der Forschungsfragen

Ziel dieser Arbeit ist die Ableitung eines Vorgehensmodells für Digitale Zwillinge der Baulogistik. Das Verständnis des Digitalen Zwillings beruht dabei auf einem Regelkreis. Der Regelkreis spiegelt die Bauproduktionsplanung und -steuerung des Bauproduktionssystems wieder. Deren Prozesse sind aufgrund einer Vielzahl von bauspezifischen Randbedingungen von einer hohen Volatilität geprägt.

Bisherige Ansätze zum Digitalen Zwilling setzen auf BIM als digitale Repräsentation des Digitalen Zwillings. BIM zeigt heute noch Limitationen hinsichtlich der baupraktischen Anwendung auf. Das aufgezeigte Vorgehensmodell setzt daher auf die Simulation als digitale Technologie zur Datennutzung. Simulation ist ein probates Mittel, um verschiedene Prozesse vorab durchzuspielen. Sie dient so der Entscheidungsfindung und -unterstützung der Bauteiligten. Wird die Simulation mit tatsächlichen Daten angereichert, können Schwachstellen aufgedeckt und die Optimierung von Bauprozessen angestoßen werden. Vorgehensmodelle zur Simulation müssen in die Vorgehensmodelle für Digitale Zwillinge überführt werden, um die Einbindung von Daten in die Baupraxis zu überführen. Dazu notwendig ist eine neue Betrachtung von Methoden zur Datensammlung, -aufbereitung und -übertragung, was mit dem vorgestellten Vorgehensmodell abgedeckt wird. Digitale Zwillinge müssen für bestimmte Anwendungen konzipiert werden, um die jeweiligen Randbedingungen zu berücksichtigen.

Für die Entwicklung eines neuen Vorgehensmodells für Digitale Zwillinge in der Baulogistik wurde die Hauptforschungsfrage (*Wie kann ein Vorgehensmodell für die Entwicklung von Digitalen Zwillingen aus ereignisorientierter Simulation in Kombination mit Prozessdaten zur Optimierung des Bauproduktionssystems für die Baulogistik aussehen?*) aufgestellt und in drei Forschungsunterfragen untergliedert, die im Folgenden diskutiert werden.

Für die Beantwortung der **ersten Forschungsunterfrage** (*Welche Aspekte müssen bei der Umsetzung eines simulationsgestützten Digitalen Zwillings für die Baulogistik berücksichtigt werden?*) wurde das aktuelle Verständnis zu Digitalen Zwillingen in den Kontext von Bauproduktionssystemen und Simulation transferiert. Der Begriff des Digitalen Zwillings wird im Ingenieurwesen in verschiedenen Bereichen verwendet. Im Grundsatz geht es um die Nutzung von Daten eines physischen in einem virtuellen System, um darauf basierend Rückschlüsse für das physische System zu erschließen. In der vorliegenden Arbeit ist das physische System der Bauprozess und das virtuelle System die Simulation.

Das theoretische Verständnis von Bauprozessen basiert auf der kybernetischen Betrachtung des Systems als Regelkreis. Aktuell ist die Lean Construction mit ihrer sozio-technischen Sicht verbreitet. Lean Construction setzt beim Menschen an. Ein Kerngedanke dabei ist, den komplexen Bauprozess so weit zu vereinfachen, dass dieser für den Menschen verständlich wird und damit eine höhere Produktivität erzielt werden kann. Werkzeuge sind die Einführung von standardisierten Abläufen, z. B. die Taktplanung. Lean Construction verfolgt dabei bestimmte Grundsätze, wie den kontinuierlichen Fluss. Bei der Optimierung von Bauprozessen kommt der Baulogistik eine besondere Rolle zu. Sie ist geprägt von einer hohen Interdisziplinarität. Sie profitiert besonders von standardisierten Abläufen und einem transparenten Informationsfluss. Das Vorgehensmodell baut auf diesen Merkmalen auf, indem das Bauproduktionssystem zunächst mit Hilfe einer Wertstromanalyse analysiert wird. Dessen Eingangsdaten werden aufgeteilt hinsichtlich dem vorliegenden Produkt, dessen Prozess, Ressource und Methode.

Darüber hinaus fehlt es bisherigen Vorgehensmodellen an der Integration von Simulation als Digitalem Zwilling in die Baupraxis. Ausschlaggebend ist die Verschmelzung von System- und Technologiesicht. Die Anforderungen und Ziele des Systems müssen von den digitalen Technologien, die im Digitalen Zwilling vereint sind, abgedeckt werden. Es wurde daher ein BPPR-Modell entwickelt, das zum einen das vorliegende System beschreibt und gleichzeitig die zum Einsatz kommenden digitalen Technologien berücksichtigt.

Letztlich sind die Vorteile der Simulation im Bauwesen anerkannt (siehe Abschnitt 1.3). Der Einsatz in der Praxis erfordert allerdings die Evolution der Simulation als Datennutzung hin zum Digitalen Zwilling durch die Integration von digitalen Technologien zur Datensammlung, -aufbereitung und -übertragung. Die erste Forschungsunterfrage kann somit wie folgt beantwortet werden.

Antwort Forschungsunterfrage 1: *Welche Aspekte müssen bei der Umsetzung eines simulationsgestützten Digitalen Zwillings für die Baulogistik berücksichtigt werden?*

Systemverständnis:

- Wertstromanalyse
- Klassifikation der Eingangsdaten (Produkt, Prozess, Ressource, Methode)

Technologieverständnis:

- Methodisches Vorgehen für die Einführung digitaler Technologien (BPPR-Modell)
- Evolution der Simulation zum Digitalen Zwilling

Die **zweite Forschungsunterfrage** (*Wie können simulationsgestützte Digitale Zwillinge für unterschiedliche Anwendungsbereiche der Baulogistik modelliert und umgesetzt werden?*) baut auf diesen Erkenntnissen auf und bewertet das Vorgehensmodell. Die Betrachtung des Vorgehensmodells anhand von drei Anwendungsbeispielen zeigte unterschiedliche

Ausprägungen der einzelnen Bausteine auf und damit die schrittweise Entwicklung der Simulation hin zum Digitalen Zwilling. Tabelle 8-3 fasst diese Ausprägungen für die drei Anwendungsbeispiele in einem Morphologischen Kasten zusammen.

Tabelle 8-3: Morphologischer Kasten für die vorgestellten Digitalen Zwillinge in der Baulogistik (eigene Darstellung)

Datensammlung	Avisierung	TaT (RFID)	Sensorsysteme
Datenaufbereitung	Manuell (Filtern, Glätten)	Teilautomatisiert (ML)	Automatisiert (CNN, RNN)
Datenübertragung	Statisch (Tabellarisch)	Dynamisch (Avisierung)	Adaptiv (Middleware)
Modellierung	Unikat	Modular	Phasenübergreifend
Implementierung	Mathematisch (Petri-Netz)	Stochastisch (Monte-Carlo-Simulation)	Generisch (constraint-basiert)
Experimente	Baufortschritt	Geräte-/Anlageneinsatz	Lager-/Lieferstrategie

Die Anwendungsbeispiele spiegeln die drei Evolutionsstufen der Simulation zum Digitalen Zwilling von der Planungs- zur Ausführungsphase wider:

1. Simulation während der Planungsphase: Modulares wiederverwendbares Simulationsmodell für den Innenausbau im Hochbau unter Berücksichtigung von Ver- und Entsorgung (Datennutzung);
2. Simulation während der Ausführungsphase:
 - Simulationsmodell zur Durchführung verschiedener Alternativen zur Optimierung von Produktion und Logistik in der Modulbauanlage (Datensammlung, -nutzung);
 - Aufbereitung von Avisierungsdaten in das Simulationsmodell zur Analyse von Anlieferstrategien für den Innenausbau im Hochbau (Datensammlung, -aufbereitung, -nutzung);
3. Simulationsgestützter Digitaler Zwilling unter Beachtung aller vier Bausteine: Einbindung von Sensordaten von Bohrgeräten zur Baufortschrittsvorhersage für den Spezialtiefbau (Datensammlung, -aufbereitung, -übertragung und -nutzung).

Daraus folgt zusammenfassend die folgende Antwort auf die zweite Forschungsunterfrage.

Antwort Forschungsunterfrage 2: *Wie können simulationsgestützte Digitale Zwillinge für unterschiedliche Anwendungsbereiche der Baulogistik modelliert und umgesetzt werden?*

- Auswahl unterschiedlicher Bauproduktionssysteme (Modul-, Hoch-, Tiefbau)
- Umsetzung verschieden ausgeprägter digitaler Technologien
- Berücksichtigung von Eingangsdaten aus der Planungs- und Ausführungsphase

Die **dritte Forschungsunterfrage** (*Welche Effekte und Potenziale ergeben sich aus den simulationsgestützten Digitalen Zwillingen?*) konnte anhand des Vergleichs der Ergebnisse aus den drei Anwendungsbeispielen beantwortet werden. Gegenüber bisherigen Simulationsansätzen wurde in der Anwendung des Vorgehensmodells die Einbindung und Nutzung von Daten geschaffen.

In den Anwendungsbeispielen konnte gezeigt werden, dass die simulationsgestützten Digitalen Zwillinge die Analyse und Optimierung von Bauprozessen ermöglichen. Sie tragen damit entscheidend zur Entscheidungsunterstützung hinsichtlich der Produktivitätssteigerung in den vorliegenden Bauproduktionssystemen bei. Der Fokus auf die Baulogistik zeigt zudem neue Lösungsansätze für die Produktion auf.

Die Ergebnisse hängen dabei von der Qualität der vorliegenden Daten ab. Durch das Aufzeigen der unterschiedlichen digitalen Technologien zur Datensammlung (siehe Tabelle 8-3) wird das Potenzial einer hohen Informationsdichte deutlich. Können mit Hilfe der RFID-Tags lediglich Zeitstempel in einem definierten Bereich erhoben werden, können aus den Sensorsystemen unterschiedliche Aktivitäten mit Start- und Endzeit abgeleitet werden.

Einen entscheidenden Einfluss bei der Auswahl dieser Technologien hat die anschließende Datenaufbereitung. Es konnte ausdrücklich gezeigt werden, dass auch ein höherer Grad an Autonomie durch die Aufbereitung von Sensordaten mit Hilfe von ML-Modellen nur eine vermeintliche Erleichterung bei der Datensammlung bietet. Zwar können Fehler, die bei der manuellen Datensammlung auftreten, vermieden werden, wie z. B. beim Anbringen von RFID-Tags oder beim manuellen Eintragen der Daten in der Avisierungssoftware, allerdings ist der Aufwand für das Schaffen eines gemeinsamen Verständnisses und von einheitlichen Begriffen unabhängig vom Grad der Autonomie bei der Datenaufbereitung. Gleiches gilt für die Konnektivität bei der Datenübertragung. Insbesondere adaptive Ansätze wie die Middleware profitieren von standardisierten Kommunikationsprotokollen.

Dieses gemeinsame Verständnis geht zurück auf die Datennutzung in der Simulation. Das Bewusstsein, die Daten für die Simulation zu nutzen, ermöglicht einen zielgerichteten Einsatz von digitalen Technologien. Daraus lässt sich ein BPPR-Modell aufstellen, um aus den Möglichkeiten der digitalen Technologien die Anforderungen an das Bauproduktionssystem zu erfüllen. Weiterhin unterstützt die Klassifizierung von Eingangsdaten nach ihren Einflüssen auf Produkt, Prozess, Ressource und Methode die Modellierung und Modularisierung der Simulation. Unternehmensspezifische Daten wie Anzahl und Art von LHMs oder THMs lassen sich in Bibliotheken für die Simulation zusammenfassen. Eine kontinuierliche Verbesserung und Anpassung von Bibliotheken auf spezifische Anwendungsbeispiele führt zu einem Katalog, der auf weitere Projekte aufwandsarm angewendet werden kann. Die dritte Forschungsunterfrage kann somit wie nachfolgend beantwortet werden.

Antwort Forschungsunterfrage 3: *Welche Effekte und Potenziale ergeben sich aus den simulationsgestützten Digitalen Zwillingen?*

- Informationsdichte, Autonomie und Konnektivität durch den geeigneten Einsatz digitaler Technologien
- Optimierung von Bauprozessen durch Simulation
- Integration in die Baupraxis
- Modularisierung und Generalisierung für weitere Projekte

Abschließend kann die **Hauptforschungsfrage** dieser Arbeit (*Wie kann ein Vorgehensmodell für die Entwicklung von Digitalen Zwillingen aus ereignisorientierter Simulation in Kombination mit Prozessdaten zur Optimierung des Bauproduktionssystems für die Baulogistik aussehen?*) wie folgt beantwortet werden: Die Entwicklung des Vorgehensmodells sieht die Betrachtung von vier Bausteinen und deren Methodiken zur Datensammlung, -aufbereitung, -übertragung und -nutzung vor. Wie in einem Regelkreis kann so eine Rückführung von Daten der physischen Entität im Bauproduktionssystem zu ihrer digitalen Repräsentation in der Simulation erfolgen. Diese Rückführung an Informationen kann sowohl in der Planungs- als auch in der Ausführungsphase erfolgen. Die Simulation ermöglicht die Optimierung von baulogistischen Prozessen und Ressourcen auf Basis von historischen Soll-Daten. Gleichzeitig wird die Vorhersage von Produktionsschritten mit aktualisierten Ist-Daten verbessert, was sich wiederum positiv auf die Verlässlichkeit der Baulogistik auswirkt. Entscheidend ist die Verknüpfung von Technologie- und Systemverständnis durch die Anwendung des neu eingeführten BPPR-Modells. Somit kann die Hauptforschungsfrage wie nachfolgend beantwortet werden.

Antwort Hauptforschungsfrage: *Wie kann ein Vorgehensmodell für die Entwicklung von Digitalen Zwillingen aus ereignisorientierter Simulation in Kombination mit Prozessdaten zur Optimierung des Bauproduktionssystems für die Baulogistik aussehen?*

Bausteinbasiertes Vorgehensmodell bestehend aus Datensammlung, -aufbereitung, -übertragung, -nutzung (Modellierung, Implementierung und Experimenten)

Insgesamt ermöglicht das Vorgehensmodell die Entwicklung und Integration von Digitalen Zwillingen als sinnvolle Erweiterung bisheriger simulationsgestützter Vorgehensmodelle für die Baulogistik. Tabelle 8-4 greift die Einordnung des entwickelten Vorgehensmodells in die Literatur auf und schließt damit die Forschungslücke.

8.3 Limitationen des Vorgehensmodells

Das vorgestellte Vorgehensmodell für Digitale Zwillinge in der Baulogistik ist insofern beschränkt, als dass es von der Sichtweise der Simulation herrührt. Das bedeutet, dass der

Tabelle 8-4: *Einordnung des entwickelten Vorgehensmodells für die Entwicklung und Integration von simulationsgestützten Digitalen Zwillingen für die Baulogistik (eigene Darstellung)*

	Anwendung			Digitale Technologie			System
Anwendung	Stationär	Hochbau	Tiefbau	Information	Automation	Konnektivität	Integration
Modulbau	●			RFID	–	–	BPPR
Hochbau		●		Avisierung	Manuell	–	BPPR
Spezialtiefbau			●	Sensordaten	KI	Middleware	BPPR
	●	●	●	●	●	●	●

Ausgangspunkt die Evolution der Simulation darstellt. Ziel war es, die Simulation zur Optimierung von Bauprozessen zu nutzen. Die Optimierung von Bauprozessen, die sich bereits durch eine Visualisierung ergeben, wie z. B. durch eine Wertstromanalyse, wurden als sinnvolle Methoden angesehen und integriert, nicht aber angepasst.

Durch die drei unterschiedlichen Anwendungsbeispiele konnte das Vorgehensmodell zur Entwicklung und Integration von Digitalen Zwillingen für den übergreifenden Bereich der Baulogistik generalisiert betrachtet werden. Die verschiedenen Ausprägungen der Digitalen Zwillinge dienten der Umsetzung und Bewertung der einzelnen Bausteine. Gleichzeitig zeigen die verschiedenen Evolutionsstufen die Möglichkeiten des Gesamtkonzepts des Vorgehensmodells auf. Innerhalb der drei Baubereiche gibt es zahlreiche weitere Anwendungen, z. B. die Sequenzierung von Modulen oder Pfählen, die in dieser Arbeit nicht weiter vertieft wurden.

Hinsichtlich der vier Bausteine für den Digitalen Zwilling sind die folgenden Limitationen aufzuzählen:

1. **Datensammlung:** Es wurde nur eine gewisse zur Verfügung stehende Auswahl an digitalen Technologien zur Datensammlung genutzt.
2. **Datenaufbereitung:** Die manuelle Datenaufbereitung ist aufwendig und fehleranfällig. Die KI-basierte Aktivitätserkennung erfolgte auf der Basis bereits vordefinierter, gesammelter Daten. Das aus den Erkenntnissen der hierarchischen Klassifikation abgeleitete BPPR-Modell zur Bestimmung der Kategorien konnte für zukünftige Klassifikationen nicht getestet werden.
3. **Datenübertragung:** Eine dynamische Datenübertragung in die Simulation wurde mit Hilfe einer Middleware vorgesehen. Die Implementierung für eine Middleware ist mit einem hohen Aufwand verbunden. Der Testaufbau erfolgte unter Laborbedingungen aufgrund von begrenzt verfügbaren Schnittstellen seitens des Geräteherstellers. Es ist zu empfehlen, dass die Middleware an ein bereits existierendes Flottenmanagement- oder ERP-System anzuschließen ist.
4. **Datennutzung:** Es wurde kein generalisiertes Simulationsmodell entwickelt, das auf alle drei Anwendungsbeispiele übertragbar ist. Vielmehr lag der Fokus auf einem

modellbasierten Ansatz für die jeweiligen Anwendungsbeispiele. Der Modellierungsaufwand wurde in allen Fällen nicht gemessen. Jedoch zeigte sich, dass sich bereits mit einem einfachen Petri-Netz signifikante Vorhersagen unter Einbindung von Ist-Daten ableiten lassen. Detaillierte Informationen und damit die Möglichkeit, Optimierungen im Bauprozess vorab zu testen, erfordern die zusätzliche Abbildung von Materialflüssen.

Insgesamt konnte in keinem der drei Anwendungsbeispiele der Digitale Zwilling im tatsächlichen Betrieb getestet werden. Die Optimierungsvorschläge, die sich durch die Experimente ergaben, wurden lediglich in Gesprächen mit Expert*innen bewertet. Aspekte zur Integration in die Baupraxis, wie Richtlinien, können daher nicht abgeleitet werden.

9 Zusammenfassung und Ausblick

9.1 Zusammenfassung

Die Bauindustrie hat das Potenzial von Industrie 4.0 zur Optimierung von Bauprozessen und damit zur Produktivitätssteigerung von Bauproduktionssystemen erkannt. Der baulogistische Einsatz von digitalen Technologien, wie der Simulation von Materialflüssen, befindet sich jedoch meist noch in der Testphase oder ist Vision. Insbesondere die ereignisorientierte Simulation wird, im Gegensatz zur Wissenschaft, in der Praxis kaum genutzt. Gründe dafür sind baustellenspezifische Besonderheiten und ein geringer Grad der Digitalisierung, die eine Nutzung der Simulation erschweren.

Insbesondere die Einbindung von Daten ermöglicht, die Simulation als Teil des Digitalen Zwillings zu betrachten. Digitale Zwillinge gehen aus den Möglichkeiten von Industrie 4.0 hervor. Indem digitale Modelle mit physischen Modellen durch Datenaustausch interagieren können, ergeben sich neue Möglichkeiten hinsichtlich der Entscheidungsfindung und Optimierung der realen Systeme. In der Bauindustrie gibt es dazu noch keine Einigkeit über den Begriff des Digitalen Zwillings. Dominante Arbeiten weisen BIM als Digitalen Zwilling aus. Ursprünglich als 3D-Modellierung verstanden, wird BIM heute als Projektmanagement-Methode betrachtet. Die Grenzen liegen allerdings noch immer in fehlenden Bemühungen im Bereich des Tiefbaus und der Baulogistik. Der objektorientierte Ansatz hat Schwächen in der Modellierung von Bauprozessen.

Im Rahmen dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass **bisherige Konzepte** zur ereignisorientierten Simulation als Digitaler Zwilling in der Baulogistik mindestens eines oder mehrere der folgenden Defizite aufweisen:

- Bisherige Simulationsmodelle werden meist in der Planung oder in der Ausführung angewendet. Eine durchgängige Verwendung fehlt.
- Es gibt Ansätze zur Nutzung von Ist-Daten in der Simulation. Bisherige Arbeiten stellen allerdings nur Teilaspekte davon vor, z. B. nur die Datenaufbereitung, nicht aber ihre vorgelagerte und nachgelagerte Sammlung und Übertragung in das Simulationsmodell.
- In den letzten Jahren ist insbesondere der Datenaufbereitung mit Hilfe von ML viel Aufmerksamkeit zugeteilt worden. Viele Anwendungen betrachten logistische Fragestellungen der Erdbewegung. Die Daten stammen dabei z. B. von angebrachten IMUs an Baugeräten oder von stationären Kameras. Die Verwendung von intern verbauten Sensorsystemen wurde noch nicht thematisiert.

Ein Vorgehensmodell für einen Digitalen Zwilling für die Baulogistik muss diese Defizite adressieren, um in der Praxis angewendet zu werden. Dazu wurde ein Vorgehensmodell aus der Kybernetik als Vorbild genommen. Die einfache Darstellung als Regelkreis verdeutlicht,

dass auf Änderungen reagiert werden kann, indem Daten in die Simulation integriert werden. Die Simulation wird auf diese Weise aktualisiert und kann anhand von Experimenten stichhaltige Argumente zur Entscheidungsunterstützung liefern. Darauf aufbauend wurde ein schrittweises Vorgehen entwickelt, das beim Aufbau und der Integration des Digitalen Zwillings in der Baulogistik unterstützt. Durch die Interdisziplinarität der Baulogistik über die verschiedenen Baugewerbe wie Hoch- und Tiefbau sowie über alle Bauphasen von der Planung bis zur Ausführung hinweg, zeigt das Vorgehensmodell eine breite Anwendungsmöglichkeit auf. Der Betrachtungsgegenstand bezieht sich dabei auf die Produktions- und Informationslogistik mit deren operativer und koordinativer Ebene auf der Baustelle.

Gegenüber bisherigen Arbeiten im Bereich der Simulation mit Daten zeigt diese Arbeit gleich drei Anwendungsbeispiele aus unterschiedlichen Bereichen auf: (1) Modulbau, (2) Hochbau und (3) Spezialtiefbau. Dabei steht die Wechselwirkung von Produktion und Logistik im Vordergrund. Die Anwendungsbeispiele zeigen auf unterschiedlichen Ebenen die Integration von Daten in die Simulation und stellen damit unterschiedliche Evolutionsstufen des Digitalen Zwillings dar.

Die **erste Evolutionsstufe** des Digitalen Zwillings stellt das Anwendungsbeispiel 1 (Modulbau) dar. Es wurden die Bausteine der Datensammlung und -nutzung umgesetzt und bewertet. Für die Datensammlung wurde ein RFID-Testaufbau zur Quantifizierung der Bereitstellung von Doppelwänden für die Montage untersucht. Für die Datennutzung konnte mit Hilfe der Simulation aufgezeigt werden, wie die Produktion der Module erhöht (61,5 % mehr Module bei Vollaussnutzung der Betonierstation) und die Durchlaufzeit im Rohbau verringert werden kann (–18,5 %) bei gleichzeitiger Bestandsreduktion der Schmetterlinge (–64 %). Der hohe Grad an Standardisierung aufgrund der vorliegenden stationären Verhältnisse einer Produktionslinie im Modulbau unterstützen das Systemverständnis und damit wiederum die Modellierung des Digitalen Zwillings.

Die **zweite Evolutionsstufe** des Digitalen Zwillings stellt das Anwendungsbeispiel 2 (Hochbau) dar. Es wurde zusätzlich der Baustein der Datenaufbereitung umgesetzt und bewertet. Die Bewertung der einzelnen Bausteine fand getrennt an zwei Hochbauprojekten statt. Das Hochbauprojekt 1 diente dem Baustein der Datennutzung. Es wurde eine modulare Simulation mit einem hohen Grad an Komplexität entwickelt. Die Entwicklung des Simulationsmodells wurde durch das aufgestellte Systemverständnis erleichtert. Das Hochbauprojekt 2 diente den Bausteinen der Datensammlung und -aufbereitung. Sie basierten auf Ist-Daten einer Avisierungssoftware für die Koordination von Materialbestellungen auf die Baustelle. Trotz fehlender Datenübertragung in die Simulation konnte das Anwendungsbeispiel das Potenzial verschiedener Anlieferstrategien aufzeigen. Am Hochbauprojekt 2 konnte anhand der aufbereiteten Ist-Daten eine deutliche Überschätzung der Soll-Daten nachgewiesen werden. Dabei hat sich die Anzahl der tatsächlich ankommenden LKWs um die Hälfte reduziert (–46 %), während die Anzahl der LHMs (–13 %) und der Materialien (–14 %) nahezu konstant blieb. Am Hochbauprojekt 1 konnten die Effekte und Potenziale dieser Anlieferstrategie mit Hilfe der

Simulation getestet werden. Demnach schneidet ein alternativer Kitting-Ansatz schlechter ab als die ursprünglich angenommene JIT-Anlieferung (34 % geringeres LKW-Aufkommen, bei 10 % mehr LHMs sowie erhöhtem Lagerflächenbedarf).

Die **dritte und höchste umgesetzte Evolutionsstufe** des Digitalen Zwillings nach dem Vorgehensmodell ist das Anwendungsbeispiel 3 (Spezialtiefbau). Es fokussiert insbesondere die Bausteine der Datenaufbereitung und -übertragung. Der komplexe Prozess der Pfahlproduktion erfordert ebenso komplexe Bohrgeräte. Der Digitalisierungsgrad der Bohrgeräte ist im Vergleich zu herkömmlichen Baugeräten wie den Hydraulikbaggern und Radladern hoch. Abgrenzend zu aktuellen Forschungsarbeiten wurden keine zusätzlichen Sensoren am Bohrgerät befestigt, sondern es konnten die bereits vorliegenden Sensordaten genutzt werden, um die Aktivitäten des Geräts zu erkennen und deren Bearbeitungszeiten abzuleiten. Es konnte gezeigt werden, dass die Nutzung der Sensordaten für die Simulation mit Hilfe von ML-Modellen möglich ist. Kombinierte DL-Modelle zeigen eine Verbesserung hinsichtlich der automatisierten Datenverarbeitung auf. Eine eigens entwickelte Middleware konnte die Möglichkeiten einer automatisierten Datenübertragung vom Bohrgerät in die Simulation aufzeigen. Mit Hilfe einer einfachen Simulation konnten die Vorteile einer Ist-Dateneinbindung gestützt werden: Mit fortschreitender Integration der Produktionsdaten verbessert sich die Vorhersage für den Baufortschritt (von 9,2 d bei 25 % Baufortschritt auf 4,6 d bei 75 % Baufortschritt). Aufgrund der Unsicherheiten und Schwankungen in der Produktion ist es wichtig, die Simulation zu aktualisieren, um Entscheidungen zu treffen. Schnittstellen zu logistischen Ressourcen für die Materialversorgung profitieren von einer zuverlässigeren Vorhersage der Produktion.

Somit konnten alle vier Bausteine für das Vorgehensmodell für Digitale Zwillinge in der Baulogistik an unterschiedlichen Anwendungsbeispielen erfolgreich umgesetzt und bewertet werden. Durch die Fokussierung auf die Simulation wird die Lücke geschlossen, dass Digitale Zwillinge im Bauwesen primär als BIM und damit zur Visualisierung des Bauprodukts und nicht zur Optimierung von baulogistischen Prozessen gesehen werden. Die zusätzliche Berücksichtigung von Daten ermöglicht die Simulationsergebnisse auf Basis aktueller Änderungen in der Planungs- und Ausführung zu bewerten.

Alle Anwendungsbeispiele tragen letztlich zur Produktivitätssteigerung in der Bauindustrie bei. Sie verdeutlichen, dass die Einführung von digitalen Technologien die Einbeziehung des Menschen erfordern, was durch das entwickelte BPPR-Modell gewährleistet wird. Insgesamt ermöglicht das dargestellte Vorgehensmodell ein methodisches Vorgehen zur Entwicklung und Integration von Digitalen Zwillingen in der Baulogistik.

9.2 Ausblick

Für den Ausblick der Arbeit ergeben sich sowohl für die einzelnen Bausteine als auch für das Gesamtkonzept des Vorgehensmodells zukünftige Forschungsfelder.

Bei der Datensammlung wurden in dieser Arbeit **Informationen aus BIM** vernachlässigt. Sie können allerdings in Zukunft für die Modellierung von Simulation genutzt werden (siehe Kapitel 3). In der Semesterarbeit von Ma [fml-2021d], gemeinsam veröffentlicht in [Fis-2021f], wird gezeigt, dass das Austauschformat für einen Digitalen Zwilling in der Baulogistik im Spezialtiefbau sinnvoll ist. Allerdings sind die BIM-Modelle insbesondere im Tiefbau bisher kaum vorhanden oder enthalten ungenügende Informationen für die Baulogistik. Dazu zählt die Erfassung des Bauprozesses inkl. der Aufschlüsselung in die Teilprozesse Bohren, Bewehren und Betonieren, um deren einzelne Start- und Endzeiten festzulegen. Darüber hinaus fehlen unternehmensspezifische Daten zu den Ressourcen, z. B. Typ, Anzahl oder Volumen.

Auch die Datenaufbereitung sollte erweitert werden, um die gesammelten Daten für die Modellerstellung zu nutzen. Die Anwendung der Simulation erfordert, auch unter Zuhilfenahme von Daten, hohes Expert*innenwissen. Gerade KMU stehen nur eine begrenzte Anzahl an Ressourcen zur Verfügung. Eine **automatisierte Modellerstellung** der bereits gezeigten modularen Simulationsmodelle kann den Aufwand weiter reduzieren. Zusätzlich unterstützt durch KI, können den Benutzenden automatisierte vorausgewählte Optimierungsvorschläge zur Routenfindung, zum Auftragsmanagement oder zur Materialzuweisung präsentiert werden.

Die Datenübertragung mit Hilfe der Middleware sollte in Zukunft eine **bidirektionale Verbindung** zwischen Gerät und Simulation ermöglichen. Der Digitale Zwilling für die Baulogistik dient der Entscheidungsfindung für die Baubeteiligten. Er dient nicht der Automatisierung des Bauprozesses durch Steuerung der Geräte auf der Baustelle, sondern der Vorhersage des Bauprozesses. Die Ergebnisse aus dem Simulationsmodell werden daher von den Menschen vor Ort genutzt, um den Bauprozess zu optimieren. Eine direkte Steuerung des Gerätes erfordert die Hinzuziehung mechatronischer Daten.

Die vorgestellte Middleware ist in ihrer Anwendung und Übertragbarkeit beschränkt. In der Praxis gibt es verschiedene Systeme, z. B. Hydraulikbagger und Verdichtungsgeräte. Obwohl es proprietäre APIs gibt, ist die einzelne Implementierung und Validierung zeitaufwendig. Für kommerzielle Zwecke ist es darüber hinaus zwingend erforderlich, den Datenzugriff und seine Nutzenden zu sichern, wie es Datentreuhandmodelle tun, z. B. Gaia-X [GAI-2024] in der Automobilindustrie oder agrirouter von DKE-Data GmbH & Co. KG in der Agrarindustrie.

Die Datennutzung mit Hilfe der Simulation zeigte bereits die Möglichkeiten der Abbildung verschiedener Fragestellungen aus der Bauproduktion und -logistik auf, z. B. die optimale Auslastung oder Anlieferung. **Weitere Optimierungsprobleme**, wie die Reihenfolge der

abzuarbeitenden Aufträge (Module, Materialien oder Pfähle), wurden nicht weiter fokussiert. Einen ersten mathematischen Ansatz liefert Rodriguez Llorens [fml-2021g] in seiner Masterarbeit zur Optimierung der Wand- und Modulreihenfolge im Modulbau. Dazu wird die Rohbau- und Montagelinie mit zwei verschiedenen Modellen vereinfacht: (1) Maschinenbelegungsmodell (engl. Flow Shop) mit Paletten und Puffern nach Hajba und Horváth [Haj-2015] für die Rohbaulinie und (2) Reihenfolgenbestimmung von Autos auf einem Fließband (engl. Car Sequencing) nach Golle et al. [Gol-2014] für die Montagelinie (siehe Abbildung 5-7). Letztlich sind die Ergebnisse vergleichbar zu denen der heuristischen Ansätze mit Hilfe der Simulation. Im Vergleich ist die Durchführung einer Simulationsstudie hingegen aufwandsarmer und bietet mehr Möglichkeiten zur Variation.

Die Terminplanungsoptimierung basierend auf Horenburg [Hor-2014] und Wenzler und Günthner [Wen-2016b] wird in den Studienarbeiten von [fml-2020d; fml-2021e; fml-2022c] und der gemeinsamen Veröffentlichung [Fis-2021a] untersucht. Der Fokus liegt dabei allerdings auf der zyklischen Verbindung von der Terminplanung (Makro-Ebene) und der detaillierten Prozesssimulation (Mikro-Ebene). Die Studienarbeiten von Li [fml-2020d; fml-2021e], Ma [fml-2021d] und Baumgartner [fml-2022c], gemeinsam veröffentlicht in [Fis-2021e; Fis-2021f], zeigen außerdem eine metaheuristische Studie zur Verteilung von bauleistungsorientierten Aufträgen von Erdabtransport und Betonanlieferung. Bei der Untersuchung von geräteintensiven Prozessen sind Ausfallzeiten als weitere relevante Kennwerte, neben der Auslastung und dem Fortschritt, miteinzubeziehen.

Die **Standardisierungsbemühungen** sind für Digitale Zwillinge von großer Bedeutung. In allen vier Bausteinen sind die folgenden Vorteile zu erkennen:

- Bedarfsorientierte Datensammlung mit Hilfe von Referenzprozessen;
- Generalisierbarkeit von trainierten Modellen der Datenaufbereitung;
- Skalierung von digitalen Technologien zur Datenübertragung durch interoperable Schnittstellen;
- Reduzierter Modellierungsaufwand bei der Datennutzung durch vordefinierte Bibliotheken oder Bausteine für wiederkehrende Objekte oder Abläufe.

Im Hinblick auf die einzelnen Schichten im standardisierten Cyber-physischen System von RAMI 4.0, wurden mit dem vorgestellten Lösungsansatz nur die untersten Schichten für den eigentlichen Baubetrieb betrachtet. Mit der Etablierung von Digitalen Zwillingen der Bauleistung stehen damit auch Möglichkeiten für **Geschäftsprozesse** offen, z. B. intern für den Einkauf von Materialien bzw. extern für die Weiterleitung an den Baustoffhandel oder Gerätevermietung. Cai [Cai-2025] stellt dazu ein Vorgehensmodell für TaT-Systeme vor. Erleichterungen der Integration dieser innovativen Lösungsansätze können durch standardisierte Produktmodelle etabliert werden, z. B. auf Basis eines systematischen Vorgehens, wie in Schöberl [Sch-2025] beschrieben.

Die Bewertung des gesamten Vorgehensmodells anhand der drei Anwendungsbeispiele erfolgte an bereits abgeschlossenen Projekten. Die Bewertung des Vorgehensmodells während der Entwicklung und Realisierung eines Projekts steht aus. Weitere Anwendungsbereiche der Baulogistik sind dabei zu erschließen, z. B. die Erdbewegung oder der Straßenbau.

Insgesamt erfordert die Anwendung von Digitalen Zwillingen die Expertise digitaler Technologien, um das Vorgehensmodell und ihre Bausteine umzusetzen. Die Bauindustrie muss sich **neue Berufsbilder und Kompetenzprofile** erarbeiten, um von den digitalen Technologien der Industrie 4.0 zu profitieren [Koh-2024].

Letztlich zeigt sich, dass Prozessverbesserungen nicht nur von Verbesserungen der Ausrüstung mit Industrie 4.0 abhängen, sondern von Verbesserungen des soziotechnischen Systems als Ganzes, um auch individuelle Menschen und organisatorische Faktoren vollständig zu berücksichtigen. Die Umsetzung von Lean-Prinzipien innerhalb und zwischen den Parteien kann helfen, die Variabilität zu erfassen. Standardarbeitsabläufe dienen dann als Grundlage für adaptive Simulationsstudien.

Literaturverzeichnis

- [Abd-2017] Abdelmegid, M. A.; Gonzalez, V. A.; Naraghi, A. M.; O'Sullivan, M.; Walker, C. G.; Poshdar, M.: Towards a conceptual modeling framework for construction simulation. In: Winter Simulation Conference (WSC). IEEE, 2017, S. 2372–2383.
- [Abd-2020a] Abdelmegid, M. A.; González, V. A.; O'Sullivan, M.; Walker, C. G.; Poshdar, M.; Ying, F.: The roles of conceptual modelling in improving construction simulation studies: A comprehensive review. In: Advanced Engineering Informatics, Jg. 46 (2020), S. 101–175.
- [Abd-2020b] Abdelmegid, M. A.; González, V. A.; Poshdar, M.; O'Sullivan, M.; Walker, C. G.; Ying, F.: Barriers to adopting simulation modelling in construction industry. In: Automation in Construction, Jg. 111 (2020), S. 103046.
- [Abd-2020c] Abdelmegid, M. A.: A Conceptual Modelling Framework for Construction Simulation. Dissertation. The University of Auckland, 2020.
- [Abd-2022] Abdelmegid, M. A.; O'Sullivan, M.; González, V. A.; Walker, C. G.; Poshdar, M.: A case study on the use of a conceptual modeling framework for construction simulation. In: SIMULATION, Jg. 98 (2022) Nr. 5, S. 433–460.
- [Abo-2010] AbouRizk, S.: Role of Simulation in Construction Engineering and Management. In: Journal of Construction Engineering and Management, Jg. 136 (2010) Nr. 10, S. 1140–1153.
- [Abo-2016a] AbouRizk, S.; Hague, S.; Ekyalimpa, R.: Construction Simulation: An Introduction Using Symphony. University of Alberta, Edmonton, Alberta, 2016.
- [Abo-2016b] AbouRizk, S.; Hague, S.; Ekyalimpa, R.; Newstead, S.: Symphony: a next generation simulation modelling environment for the construction domain. In: Journal of Simulation, Jg. 10 (2016) Nr. 3, S. 207–215.
- [Aga-1998] Agapiou, A.; Clausen, L. E.; Flanagan, R.; Norman, G.; Notman, D.: The role of logistics in the materials flow control process. In: Construction Management and Economics, Jg. 16 (1998) Nr. 2, S. 131–137.
- [Aga-2020] Agalinos, K.; Ponis, S. T.; Aretoulaki, E.; Plakas, G.; Efthymiou, O.: Discrete Event Simulation and Digital Twins: Review and Challenges for Logistics. In: Procedia Manufacturing, Jg. 51 (2020), S. 1636–1641.
- [Ahn-2015a] Ahn, C. R.; Lee, S.; Peña-Mora, F.: Application of Low-Cost Accelerometers for Measuring the Operational Efficiency of a Construction Equipment Fleet. In: Journal of Computing in Civil Engineering, Jg. 29 (2015) Nr. 2, S. 04014042.

- [Ahn-2015b] Ahn, S.; Dunston, P. S.; Kandil, A.; Martinez, J. C.: Data-Driven Analysis Framework for Activity Cycle Diagram-Based Simulation Modeling of Construction Operations. In: *Computing in Civil Engineering*. 2015, S. 638–635.
- [Ahn-2015c] Ahn, S.; Dunston, P. S.; Kandil, A.; Martinez, J. C.: Process Mining Technique for Automated Simulation Model Generation Using Activity Log Data. In: *Computing in Civil Engineering*. 2015, S. 636–643.
- [AHO-2020] AHO Ausschuss der Verbände und Kammern der Ingenieure und Architekten für die Honorarordnung e. V.: *Projektmanagement in der Bau- und Immobilienwirtschaft - Standards für Leistungen und Vergütung: Leistungsbild und Honorierung*. 5., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage, Stand: März 2020. Nr. 9. AHO-Schriftenreihe. Reguvis Kooperationspartner des Bundesanzeiger Verlages, Köln, 2020.
- [AHO-2021] AHO Ausschuss der Verbände und Kammern der Ingenieure und Architekten für die Honorarordnung e. V.: *Honorarordnung für Architekten und Ingenieure - HOAI 2021: Verordnung über die Honorare für Architekten- und Ingenieurleistungen: Textausgabe mit amtlicher Begründung*. Wolters Kluwer Deutschland GmbH, Hürth, 2021.
- [Aka-2015] Akanmu, A.; Anumba, C. J.: Cyber-physical systems integration of building information models and the physical construction. In: *Engineering, Construction and Architectural Management*, Jg. 22 (2015) Nr. 5, S. 516–535.
- [Akh-2013] Akhavian, R.; Behzadan, A. H.: Automated knowledge discovery and data-driven simulation model generation of construction operations. In: *Winter Simulation Conference (WSC)*. IEEE, 2013, S. 3030–3041.
- [Akh-2014] Akhavian, R.; Behzadan, A. H.: Evaluation of queuing systems for knowledge-based simulation of construction processes. In: *Automation in Construction*, Jg. 47 (2014), S. 37–49.
- [Akh-2015a] Akhavian, R.; Behzadan, A.: Wearable sensor-based activity recognition for data-driven simulation of construction workers' activities. In: *Winter Simulation Conference (WSC)*. IEEE, 2015, S. 3333–3344.
- [Akh-2015b] Akhavian, R.; Behzadan, A. H.: Construction equipment activity recognition for simulation input modeling using mobile sensors and machine learning classifiers. In: *Advanced Engineering Informatics*, Jg. 29 (2015) Nr. 4, S. 867–877.
- [Akh-2018] Akhavian, R.; Behzadan, A. H.: Coupling human activity recognition and wearable sensors for data-driven construction simulation. In: *Journal of Information Technology in Construction*, Jg. 23 (2018), S. 1–15.

-
- [Ala-1997] Alarcón, L. (Hrsg.): Lean construction. Balkema, Rotterdam, Niederlande, 1997.
- [Als-2020] Alsakka, F.; Khalife, S.; Darwish, M.; Al-Hussein, M.; Mohamed, Y.: Deploying Discrete-Event Simulation and Continuous Improvement to Increase Production Rate in a Modular Construction Facility. In: Winter Simulation Conference (WSC). IEEE, 2020, S. 1676–1687.
- [Alt-2015] Altaf, M. S.; Liu, H.; Al-Hussein, M.; Yu, H.: Online simulation modeling of prefabricated wall panel production using RFID system. In: Winter Simulation Conference (WSC). IEEE, 2015, S. 3379–3390.
- [Alt-2018] Altaf, M. S.; Bouferguene, A.; Liu, H.; Al-Hussein, M.; Yu, H.: Integrated production planning and control system for a panelized home prefabrication facility using simulation and RFID. In: Automation in Construction, Jg. 85 (2018), S. 369–383.
- [Alv-2006] Da Alves, T. C.; Ballard, G.; Tommelein, I. D.: Simulation as a Tool for Production System Design in Construction. In: 14th Annual Conference of the International Group for Lean Construction, Jg. 14 (2006).
- [Arn-2007] Arnold, D.; Isermann, H.; Kuhn, A.; Tempelmeier, H.; Furmans, K. (Hrsg.): Handbuch Logistik. 3. Aufl. VDI. Springer, 2007.
- [Arn-2009] Arnold, D.; Furmans, K.: Materialfluss in Logistiksystemen. 6., erw. Aufl. VDI. Springer, Berlin und Heidelberg, 2009.
- [Bai-2020] Bait, S.; Di Pietro, A.; Schiraldi, M. M.: Waste Reduction in Production Processes through Simulation and VSM. In: Sustainability, Jg. 12 (2020) Nr. 8, S. 3291.
- [Baj-2016] Bajaj, M.; Cole, B.; Zwemer, D.: Architecture To Geometry - Integrating System Models With Mechanical Design. In: AIAA SPACE 2016. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, Virginia, 2016.
- [Baj-2017] Bajjou, M. S.; Chafi, A.; En-Nadi, A.: A Comparative Study between Lean Construction and the Traditional Production System. In: International Journal of Engineering Research in Africa, Jg. 29 (2017), S. 118–132.
- [Bal-2000] Ballard, H. G.: The last planner system of production control. Dissertation. The University of Birmingham, 2000.
- [Bal-2017] Baltes, G.; Freyth, A.: Die radikal neuen Anforderungen unserer Zeit und die Konsequenz für Veränderungsarbeit. In: Baltes, G.; Freyth, A. (Hrsg.): Veränderungsintelligenz. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2017, S. 1–79.
- [Bal-2021] Ballard, G.; Tommelein, I. D.: Current Process Benchmark for the Last Planner System. Bericht. University of California, Berkeley, 2021.

- [Bam-2019] Bamana, F.; Lehoux, N.; Cloutier, C.: Simulation of a Construction Project: Assessing Impact of Just-in-Time and Lean Principles. In: Journal of Construction Engineering and Management, Jg. 145 (2019) Nr. 5.
- [Ban-1988] Banks, J.; Gerstein, D.; Searles, S. P.: Modeling Processes, Validation, and Verification of Complex Simulations: A Survey. In: Methodology and validation, Jg. 19 (1988) Nr. 1, S. 13–18.
- [Ban-2010] Banks, J.; Carson, J. S.; Nelson, B. L.; Nicol, D. M.: Discrete-event system simulation. Pearson Education (US), 2010.
- [Ban-2017] Banerjee, A.; Dalal, R.; Mittal, S.; Joshi, K. P.: Generating Digital Twin Models using Knowledge Graphs for Industrial Production Lines. In: Proceedings of the 2017 ACM on Web Science Conference. ACM, New York, NY, USA, 2017, S. 425–430.
- [Bas-2008] Bastian, P.: Grundlagen der Modellbildung und Simulation. Vorlesungsskript. Institut für Parallele und Verteilte Systeme, Universität Stuttgart, 2008.
- [Bau-2007] Bauer, H.: Baubetrieb. 3. Aufl. VDI-Buch. Springer-Verlag, 2007.
- [Bau-2021] Bauernhansl, T. (Hrsg.): Ganzheitliche Produktionssysteme 4.0: Anforderungen an die Gestaltung von Methoden und Werkzeugen in ganzheitlichen Produktionssystemen. 2021.
- [BAU-2023] BAUER Maschinen GmbH: Bohrverfahren. Hrsg. von BAUER Maschinen GmbH. 2023. <https://www.bauer.de/de/publikationen>, Aufruf am 2.11.2023.
- [BAU-2024a] BAUER Maschinen GmbH: fielddata: Ihre digitale Working-Plattform für den Spezialtiefbau. 2024. <https://equipment.bauer.de/de/fielddata>, Aufruf am 15.9.2024.
- [BAU-2024b] BAUER Maschinen GmbH: WEB-BGM Gerätemanagement. 2024. <https://equipment.bauer.de/de/web-bgm>, Aufruf am 4.7.2024.
- [Baz-2015] Bazilevs, Y.; Deng, X.; Korobenko, A.; Di Lanza Scalea, F.; Todd, M. D.; Taylor, S. G.: Isogeometric Fatigue Damage Prediction in Large-Scale Composite Structures Driven by Dynamic Sensor Data. In: Journal of Applied Mechanics, Jg. 82 (2015) Nr. 9.
- [BCG-2017] BCG The Boston Consulting Group: Is UK Industry ready for the Fourth Industrial Revolution? 2017. <https://media-publications.bcg.com/Is-UK-Industry-Ready-for-the-Fourth-Industrial-Revolution.pdf>, Aufruf am 26.5.2023.

-
- [Bec-2023] Beck, B.; Jacob, R.; Köhler, S.; Ritz, D.; Schwarzenberg, N.; Waurich, V.; Cai, Z.; Fischer, A.; Kessler, S.; Schöberl, M.; Mothes, M.; Eichner, W.; Semel, M.; Tigges, A.; Vogel, M.; Dillinger, S.; Schumacher, A.; Richter, S.; Okada, H.; Nohlen, U.; Popelka, R.; Gundermann, J.; Jähne, H.; Schulte, G.; Kehrer, O.; Augustin, T.; Top, F.: Bauen 4.0: Effizientere und produktivere Bauprozesse durch Vernetzung und Kommunikation mobiler Maschinen. Abschlussbericht. Technische Universität Dresden, 2023.
- [Beh-2015] Behzadan, A. H.; Pradhan, A. R.; Menassa, C. C.: Enabling real time simulation of architecture, engineering, construction, and facility management (AEC/FM) systems: a review of formalism, model architecture, and data representation. In: Journal of Information Technology in Construction, Jg. 20 (2015), S. 1–23.
- [Bei-2012] Beißert, U.: Constraint-basierte Simulation zur Terminplanung von Ausführungsprozessen: Repräsentation baubetrieblichen Wissens mittels Soft Constraints. Dissertation. Bauhaus Universität Weimar, 2012.
- [Ben-2013] Benesch, T.: Schlüsselkonzepte zur Statistik. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 2013.
- [Ber-1984] Berg, G.: REFA in der Baupraxis: Teil 1, Grundlagen. 2. Aufl. ZTV-Verl., Frankfurt/Main, 1984.
- [Bha-2012] Bhavsar, H.; Ganatra, A.: A Comparative Study of Training Algorithms for Supervised Machine Learning. In: International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE), Jg. 2 (2012).
- [Bin-2018] Binninger, M.; Wolfbeiß, O.: Taktplanung und Taktsteuerung im Schlüsselfertigbau - Einfluss der Losgröße und Limits in der Taktzeit. In: Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI-Bautechnik. Jahresausgabe 2018/2019. 2018.
- [Bla-1983] Blazewicz, J.; Lenstra, J.; Rinnooy Kann, A. H. G.: Scheduling subject to resource constraints: Classification and complexity. In: Discrete Applied Mathematics, (1983) Nr. 5, S. 11–24.
- [Boe-2006] Boenert, L.; Blömeke, M.: Kostensenkung durch ein zentrales Logistikmanagement. In: Clausen, U. (Hrsg.): Baulogistik - Konzepte für eine bessere Ver- und Entsorgung im Bauwesen. Logistik, Verkehr und Umwelt. Praxiswissen, Dortmund, 2006, S. 29–41.
- [Boj-2020] Boje, C.; Guerriero, A.; Kubicki, S.; Rezgui, Y.: Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research. In: Automation in Construction, Jg. 114 (2020), S. 103179.

- [Bor-2024] Borrmann, A.; Schlenger, J.; Bus, N.; Sacks, R.: AEC Digital Twin Data - Why Structure Matters. In: Skatulla, S.; Beushausen, H. (Hrsg.): Advances in Information Technology in Civil and Building Engineering. 357. Lecture Notes in Civil Engineering. Springer International Publishing, Cham, Schweiz, 2024, S. 651–669.
- [Bos-1992] Boser, B. E.; Guyon, I. M.; Vapnik, V. N.: A training algorithm for optimal margin classifiers. In: Proceedings of the fifth annual workshop on Computational learning theory. ACM, New York, NY, USA, 1992, S. 144–152.
- [Bos-2016] Boschert, S.; Rosen, R.: Digital Twin—The Simulation Aspect. In: Hehenberger, P.; Bradley, D. (Hrsg.): Mechatronic Futures. Springer International Publishing, Cham, Schweiz, 2016, S. 59–74.
- [Bou-2017] Boureau, L.: From Customer Service to Customer Experience: The Drivers, Risks and Opportunities of Digital Transformation. In: Klewes, J.; Popp, D.; Rost-Hein, M. (Hrsg.): Out-thinking Organizational Communications. Management for Professionals. Springer International Publishing, Cham, Schweiz, 2017, S. 145–155.
- [Bra-2011] Braaksma, A.; Klingenberg, W.; van Exel, P.: A review of the use of asset information standards for collaboration in the process industry. In: Computers in Industry, Jg. 62 (2011) Nr. 3, S. 337–350.
- [Bre-1984] Breiman, L.; Friedman, J. H.; Olshen, R. A.; Stone, C. J.: Classification And Regression Trees. Chapman & Hall/CRC, 1984.
- [Bre-2015] Bregenhorst, T.: Bauproduktionsplanung und -steuerung nach den Prinzipien des Lean Managements im Spezialfall Erdbau. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie, 2015.
- [Bre-2021] Breitfuß, M.; Schöberl, M.; Fottner, J.: Safety through Perception: Multi-modal Traversability Analysis in rough outdoor environments. In: IFAC-PapersOnLine, Jg. 54 (2021) Nr. 1, S. 223–228.
- [Bro-2010] Broy, M. (Hrsg.): Cyber-Physical Systems: Innovation durch softwareintensive eingebettete Systeme. acatech DISKUTIERT. Springer, Berlin, Heidelberg und München, 2010.
- [Brö-2015] Brömer, K.: Bauwirtschaft und Konjunktur: Bedeutung und Auswirkung staatlicher Nachfragesteuerung auf die Bauwirtschaft. Dissertation. Baubetriebswirtschaftslehre und Infrastrukturmanagement, Technische Universität Bergakademie Freiberg, 2015.
- [Brz-2023] Brzezinski, R.: Erstellen eines AHO-konformen Projekthandbuchs. Entwicklung neuer Ansätze zum nachhaltigen Planen und Bauen. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2023.

-
- [BSI-2023] BSI Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik: Künstliche Intelligenz. 2023. https://www.bsi.bund.de/DE/Themen/Unternehmen-und-Organisationen/Informationen-und-Empfehlungen/Kuenstliche-Intelligenz/kuenstliche-intelligenz_node.html, Aufruf am 1.6.2024.
- [Büg-2014] Bügler, M.; Ogunmakin, G.; Teizer, J.; Vela, P. A.; Borrmann, A.: A comprehensive methodology for vision-based progress and activity estimation of excavation processes for productivity assessment. In: EG-ICE 2014, European Group for Intelligent Computing in Engineering - 21st International Workshop: Intelligent Computing in Engineering 2014, (2014).
- [Büg-2016] Bügler, M.: Reactive Simulation of Shoring and Excavation Processes based on Automated Performance Monitoring. Dissertation. Lehrstuhl für Computergestützte Modellierung und Simulation, Technische Universität München, 2016.
- [Büg-2017] Bügler, M.; Borrmann, A.; Ogunmakin, G.; Vela, P. A.; Teizer, J.: Fusion of Photogrammetry and Video Analysis for Productivity Assessment of Earthwork Processes. In: Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Jg. 32 (2017) Nr. 2, S. 107–123.
- [Bui-2022] BuildingSMART Germany: buildingSMART-Roundtable Modellbasierte Baulogistik. 2022. <https://www.buildingsmart.de/arbeitsgruppen-von-buildingsmart-deutschland>, Aufruf am 4.8.2023.
- [Cai-2022] Cai, Z.; Etkar, D.; Kessler, S.; Fottner, J.: Design and Validation of an Internet of Things (IoT) based Architecture for the Construction Industry. In: Proceedings of WCSE 2022 Spring Event: 2022 9th International Conference on Industrial Engineering and Applications. WCSE, 2022.
- [Cai-2025] Cai, Z.: Systematische Integration der Tracking-and-Tracing-Technologien zur Digitalisierung der baulogistischen Prozesse (noch nicht veröffentlicht). Dissertation. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, 2025.
- [Cha-2000] Chapman, P.; Clinton, J.; Kerber, R.; Khabaza, T.; Reinartz, T.; Shearer, C.; Wirth, R.: CRISP-DM 1.0: Step-by-step data mining guide. 2000.
- [Che-2019] Cheng, C.-F.; Rashidi, A.; Davenport, M. A.; Anderson, D. V.: Evaluation of Software and Hardware Settings for Audio-Based Analysis of Construction Operations. In: International Journal of Civil Engineering, Jg. 17 (2019) Nr. 9, S. 1469–1480.
- [Cho-2021] Chollet, F.: Deep Learning with Python. 2. Aufl. Manning Publications, 2021.

- [Chr-2015] Chriti, M.: Aufnahme des zeitlichen Arbeitsaufwandes und Ermittlung von Stundenaufwandswerten des technischen Führungspersonals bei Bauvorhaben im Bereich Tiefbau/Infrastrukturbau. Diplomarbeit. Technische Universität Wien, 2015.
- [Cla-2006] Clausen, U. (Hrsg.): Baulogistik - Konzepte für eine bessere Ver- und Entsorgung im Bauwesen: Beiträge der BauLog 2004, Fraunhofer IML. Logistik, Verkehr und Umwelt. Praxiswissen, Dortmund, 2006.
- [Cor-2019] Correa, F.: Simulating Wood-framing Wall Panels Production with Timed Coloured Petri Nets. In: Proceedings of the 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC). International Association for Automation and Robotics in Construction (IAARC), 2019, S. 1026–1033.
- [Cor-2024] Correa, F.; Roda, A. M.; Scheer, S.: Automatically Quantifying Movement of Prefabricated Building Components on Site for a Location-Based Management System: An Ecosystem for Digital Twin Construction. In: Skatulla, S.; Beushausen, H. (Hrsg.): Advances in Information Technology in Civil and Building Engineering. 357. Lecture Notes in Civil Engineering. Springer International Publishing, Cham, Schweiz, 2024, S. 615–631.
- [Cov-1967] Cover, T.; Hart, P.: Nearest neighbor pattern classification. In: IEEE Transactions on Information Theory, Jg. 13 (1967) Nr. 1, S. 21–27.
- [Cud-2020] Cudmani, R.; Rebstock, D.; Schorr, J.: Geotechnical Challenges for the Numerical Prediction of the Settlement Behaviour of Foundations in Rosenheim's Seeton. In: Triantafyllidis, T. (Hrsg.): Recent Developments of Soil Mechanics and Geotechnics in Theory and Practice. 91. Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics. Springer International Publishing, Cham, Schweiz, 2020, S. 323–346.
- [Dan-2020] Danjou, C.; Bled, A.; Cousin, N.; Roland, T.; Perrier, N.; Bourgault, M.; Pellerin, R.: Industry 4.0 in Construction Site Logistics: A Comparative Analysis of Research and Practice. In: Journal of Modern Project Management, Jg. 7 (2020) Nr. 4, S. 296–310.
- [Das-2018] Das, S.; Cakmak, U. M.: Hands-On Automated Machine Learning: A beginner's guide to building automated machine learning systems using AutoML and Python. 1. Aufl. PACKT Publishing Limited, Birmingham, 2018.
- [DAT-2023] DATA AHEAD AG: Die digitale Lösung für stressfreie Baustellen-Logistik: xitavis - Transporte und Flächen im Griff. 2023. <https://dataahead.de/baulogistik/>, Aufruf am 4.11.2023.
- [Dat-2023a] Data Base Camp: Was ist die Batch Normalization? 2023. <https://databasecamp.de/ki/batch-normalization>, Aufruf am 23.11.2023.

-
- [Dat-2023b] Data Base Camp: Was ist die Dropout Layer? 2023. <https://databasecamp.de/ki/dropout-layer>, Aufruf am 23.11.2023.
- [Dat-2023c] Data Base Camp: Was ist eine Aktivierungsfunktion? 2023. <https://databasecamp.de/ki/aktivierungsfunktion>, Aufruf am 8.6.2024.
- [Den-2020] Dengler, J.: Entwicklung eines Berechnungsmodells zur Simulation und Optimierung der Materiallogistik im Hochbau. Masterarbeit. Hochschule Biberach, 2020.
- [DIN-1536] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Bohrpfähle. DIN EN, Nr. 1536, 2015.
- [DIN-22475-1] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Probenentnahmeverfahren und Grundwassermessungen - Teil 1: Technische Grundlagen für die Probenentnahme von Boden, Fels und Grundwasser (ISO 22475-1:2021): Deutsche Fassung EN ISO 22475-1:2021. DIN EN ISO, Nr. 22475-1, 2022.
- [DIN-91345] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0). DIN SPEC, Nr. 91345:2016-04, 2016.
- [DIN-9245] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Erdbaumaschinen: Leistung der Maschinen - Begriffe, Formelzeichen und Einheiten. DIN ISO, Nr. 9245:1995-01, 1995.
- [Ele-2012] Eley, M.: Simulation in der Logistik: Eine Einführung in die Erstellung ereignisdiskreter Modelle unter Verwendung des Werkzeuges Plant Simulation. Springer-Lehrbuch. Springer/Gabler, 2012.
- [Eri-2017] Erikstad, S. O. (Hrsg.): Merging Physics, Big Data Analytics and Simulation for the Next-Generation Digital Twins. 11th Symposium on High-Performance Marine Vehicles. Technical University Hamburg-Harburg, Zevenwacht, 2017.
- [Fei-2016] Feine, I.; Smarsly, K.; Bargstädt, H.-J.: Scenario simulations for improved production planning in construction engineering using standard simulation software. In: Proceedings of the 16th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering. Osaka, Japan, 2016.
- [Fen-2021] Feng, H.; Chen, Q.; Garcia de Soto, B.: Application of digital twin technologies in construction: An overview of opportunities and challenges. In: Proceedings of the 38th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC). International Association for Automation and Robotics in Construction (IAARC), 2021, S. 979–986.
- [Fie-1991] Fiedler, K.; Berbig, R.; Rothkegel, U.; Schneidenbach, M.; Schoß, H.; Wagner, C.: Grundlagen der Technologie im Baubetriebswesen. 3. Aufl. Verlag für Bauwesen, Berlin, 1991.

- [Fie-2018] Fiedler, M. (Hrsg.): Lean Construction - Das Managementhandbuch: Agile Methoden und Lean Management im Bauwesen. Springer Gabler, Berlin, 2018.
- [Fil-2016] Filho, Antonio N. de Miranda; Heineck, L. F. M.; Da Costa, J. M.: Using Lean to Counteract Complexity. In: 23rd Annual Conference of the International Group for Lean Construction, (2016).
- [Fis-2020] Fischer, A.; Balakrishnan, G.; Kessler, S.; Fottner, J.: Begleitende Prozesssimulation für das Kellybohrverfahren [Accompanying process simulation for the Kelly drilling process]. In: 8. Fachtagung Baumaschinentechnik 2020. 2020.
- [Fis-2021a] Fischer, A.; Li, Z.; Wenzler, F.; Kessler, S.; Fottner, J.: Cyclic Update of Project Scheduling by Using Telematics Data. In: IFAC-PapersOnLine, Jg. 54 (2021) Nr. 1, S. 217–222.
- [Fis-2021b] Fischer, A.; Liang, M.; Orschlet, V.; Bi, H.; Kessler, S.; Fottner, J.: Detecting Equipment Activities by Using Machine Learning Algorithms. In: 17th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing (INCOM 2021). Budapest, Hungary, 2021.
- [Fis-2021c] Fischer, A.; Beiderwellen Bedrikow, A.; Kessler, S.; Fottner, J.: Equipment data-based activity recognition of construction machinery. In: 2021 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC). IEEE, 2021, S. 1–6.
- [Fis-2021d] Fischer, A.; Grimm, N.; Tommelein, I. D.; Kessler, S.; Fottner, J.: Variety in Variability in Heavy Civil Engineering. In: Proc. 29th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC), Jg. 29 (2021).
- [Fis-2021e] Fischer, A.; Li, Z.; Kessler, S.; Fottner, J.: Importance of secondary processes in heavy equipment resource scheduling using hybrid simulation. In: Proceedings of the 38th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC). International Association for Automation and Robotics in Construction (IAARC), 2021.
- [Fis-2021f] Fischer, A.; Ma, S.; Kessler, S.; Fottner, J.: Integrating BIM for DES-based resource scheduling: A validation for pile drilling production. In: Proceedings of the 38th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC). International Association for Automation and Robotics in Construction (IAARC), 2021.
- [Fis-2022] Fischer, A.; Rodriguez Llorens, J.; Cai, Z.; Wilke, M.; Kessler, S.; Fottner, J.: Implementation of a digital twin framework in the modular housing industry. In: 28th IEEE ICE/ITMC & 31st IAMOT Conference IEEE, (2022).

-
- [Fis-2023a] Fischer, A.; Beiderwellen Bedrikow, A.; Tommelein, I. D.; Nübel, K.; Fottner, J.: From Activity Recognition to Simulation: The Impact of Granularity on Production Models in Heavy Civil Engineering. In: Algorithms, Jg. 16 (2023) Nr. 4, S. 212.
- [Fis-2023b] Fischer, A.; Sun, Y.; Kessler, S.; Fottner, J.: Microservice-Based Middleware for a Digital Twin of g Equipment-Intensive Construction Processes. In: 40th International Symposium on Automation and Robotics in Construction. Chennai, Indien, 2023.
- [Fis-2024] Fischer, A.; Schneider, M.; Cai, Z.; Lipsmeier, K.; Hochrein, A.; Fottner, J.: Construction Logistics – An Underrated Topic and an Educational Gap in University Teaching. In: Fottner, J.; Nübel, K.; Matt, D. (Hrsg.): Construction Logistics, Equipment, and Robotics. 390. Lecture Notes in Civil Engineering. Springer Nature Switzerland, Cham, 2024, S. 3–14.
- [fml-2019] Hauser, L.: Development and implementation of an intelligent database concept for market analysis in special foundation. Masterarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, 2019.
- [fml-2020] Ji, S.: Markt- und Nutzeranalyse zur Digitalisierung der Baustelle. Semesterarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, 2020.
- [fml-2020b] Schiegg, A.: Aufbereitung von historischen Maschinendaten auf Basis von Verteilungsfunktionen am Beispiel des Kellybohrverfahrens. Semesterarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, 2020.
- [fml-2020c] Buck, H.: Optimierung der ein- und ausgehenden Logistikströme durch Echtzeit-Konnektivität und Standortintelligenz. Masterarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, 2020.
- [fml-2020d] Li, Z.: Entwicklung eines ereignisorientierten Simulationsmodells zur Einbindung von realen Baustellendaten im Austausch mit dem Terminplan. Semesterarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, 2020.
- [fml-2020e] Smida, H.: Entwicklung eines Konzepts für eine Webapplikation unter Einbeziehung von Maschinendaten. Bachelorarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, 2020.
- [fml-2020f] Ji, S.: Analyse des aktuellen Stands der ereignisdiskreten Simulation im Bauwesen und Entwicklung einer Simulationsstudie anhand eines konkreten Fallbeispiels. Masterarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, 2020.

- [fml-2020g] Balakrishnan, G.: Implementation of a middleware to connect machine data from an external platform and a simulation tool. Interdisziplinäres Projekt. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, 2020.
- [fml-2020h] Schmitt, K.: Development of an Application for Usage and Visualization of Process Simulation in Construction Projects: Entwicklung eines web-basierten Tools zur Nutzung und Visualisierung von Prozesssimulation im Bauwesen. Interdisziplinäres Projekt. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, 2020.
- [fml-2020i] Liang, M.: Analyse von Maschinendaten im Spezialtiefbau mit Hilfe von Maschinellem Lernen: Analysis of Machine Data in Special Foundation Engineering using Machine Learning. Semesterarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, 2020.
- [fml-2020j] Orschlet, V.: Analyse zur Aktivitätserkennung bei Baumaschinen unter Anwendung von Machine Learning. Masterarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, 2020.
- [fml-2020k] Grimm, N.: Analyse der aktuellen Grundlagen zur digitalen Leistungsermittlung von Baumaschinen. Bachelorarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, 2020.
- [fml-2020l] Li, R.: Analyse des aktuellen Stands der ereignisdiskreten Simulation im Bauwesen. Masterarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, 2020.
- [fml-2020m] Bi, H.: Anwendung von künstlichen neuronalen Netzen zur Analyse von Maschinendaten. Semesterarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, 2020.
- [fml-2021] Gschwendtner, C.: Development and Analysis of Process Simulation in Building Construction. Masterarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, 2021.
- [fml-2021b] Stöckl, B.: Development of a web interface to display and edit machine data. Interdisziplinäres Projekt. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, 2021.
- [fml-2021c] Zhu, X.: Entwicklung eines Simulationsmodells zur Integration und Analyse von Erdbewegungsdaten: Development of a simulation model for the integration and analysis of earthmoving data. Semesterarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, 2021.

-
- [fml-2021d] Ma, S.: Entwicklung einer ereignisdiskreten Simulation auf Basis von BIM. Masterarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, 2021.
- [fml-2021e] Li, Z.: Erweiterung des zyklischen Ansatzes zur Kombination von Mikrosimulation und Makrosimulation. Masterarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, 2021.
- [fml-2021f] Beiderwellen Bedrikow, A.: Equipment data-based activity recognition of construction machinery. Bachelorarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, 2021.
- [fml-2021g] Rodriguez Llorens, J.: Holistic Optimization of a Modular Building Production Plant using Discrete-Event Simulation. Masterarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, 2021.
- [fml-2022] Sun, Y.: Extension of a middleware by IoT systems and additional machine systems. Interdisziplinäres Projekt. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, 2022.
- [fml-2022b] Kesan, A.: Development of a visualizing 3D Application for Construction Machine Data: Entwicklung eines Unity Front-Ends für einen Demonstrator im Spezialtiefbau. Interdisziplinäres Projekt. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, 2022.
- [fml-2022c] Baumgartner, P.: Verwendung einer Ablaufsimulation als Basis eines digitalen Zwillings eines Tiefbauprojekts. Semesterarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, 2022.
- [fml-2023] Baumgartner, P.: Application of the Work Density Method to Special Foundation Engineering. Masterarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, 2023.
- [fml-2023b] Grimm, N.: Simulationsbasierte Untersuchungen zur Datenintegration für den Digitalen Zwilling in der Baulogistik: Simulation-based Studies on Data Integration for the Digital Twin in Construction Logistics. Semesterarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, 2023.
- [Fos-2016] Fosse, R.; Spitler, L.; Alves, T.: Deploying BIM in a Heavy Civil Project. In: Proc. 24th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC). 2016, S. 43–52.
- [Fot-2022] Fottner, J.: Materialfluss und Logistik: Wintersemester 2022/2023. Vorlesungsskriptum. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, 2022.

- [Fot-2023] Fottner, J.: Förder- und Materialflusstechnik: Sommersemester 2023. Vorlesungsskriptum. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, 2023.
- [Fra-2011] Franz, V. (Hrsg.): Simulation von Unikatprozessen: Neue Anwendungen aus Forschung und Praxis; 2. IBW-Workshop. 8. Schriftenreihe Bauwirtschaft 3, Tagungen und Berichte. Kassel Univ. Press, Kassel, 2011.
- [Ful-2020] Fuller, A.; Fan, Z.; Day, C.; Barlow, C.: Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. In: IEEE Access, Jg. 8 (2020), S. 108952–108971.
- [GAI-2024] GAIA-X: Eine vernetzte Datenstruktur für ein europäisches digitales Ökosystem. Hrsg. von Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. 2024. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/gaia-x.html>, Aufruf am 24.12.2024.
- [Gan-2016] Gandhi, P.; Khanna, S.; Ramaswamy, S.: Which Industries Are the Most Digital (and Why)? Hrsg. von Harvard Business Review. 2016. <https://hbr.org/2016/04/a-chart-that-shows-which-industries-are-the-most-digital-and-why>, Aufruf am 24.12.2024.
- [Geh-2023] Gehring, M.; Rüppel, U.: Data fusion approach for a digital construction logistics twin. In: Frontiers in Built Environment, Jg. 9 (2023).
- [Gér-2019] Géron, A.: Hands-on machine learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow: Concepts, tools, and techniques to build intelligent systems. 2. Aufl. O'Reilly Media, 2019.
- [Gir-2006] Girmscheid, G.: Strategisches Bauunternehmensmanagement: Prozessorientiertes integriertes Management für Unternehmen in der Bauwirtschaft. Springer, Berlin und Heidelberg, 2006.
- [Gir-2010] Girmscheid, G.: Angebots- und Ausführungsmanagement - Leitfaden für Bauunternehmen: Erfolgsorientierte Unternehmensführung vom Angebot bis zur Ausführung. 2. Aufl. VDI-Buch. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [Gla-2012] Glaessgen, E.; Stargel, D.: The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles. In: 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference
20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference
14th AIAA. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, Virginia, 2012.
- [GLC-2019] GLCI German Lean Construction Institute e. V.: GLCI Lean Construction Begriffe und Methoden. Hrsg. von GLCI German Lean Construction Institute e. V. 2019. https://glci.de/wp-content/uploads/2023/04/GLCI-Begriffe-und-Methoden_Gesamtdokument_neu.pdf, Aufruf am 30.12.2023.

-
- [Gog-2017] Goger, G.; Piskernik, M.; Urban, H.: 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. Studie. Institut für Interdisziplinäres Bauprozessmanagement, Technische Universität Wien, 2017.
- [Gol-1989] Goldberg, D. E.: Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. 2. Aufl. Addison-Wesley, 1989.
- [Gol-2013] Golparvar-Fard, M.; Heydarian, A.; Niebles, J. C.: Vision-based action recognition of earthmoving equipment using spatio-temporal features and support vector machine classifiers. In: Advanced Engineering Informatics, Jg. 27 (2013) Nr. 4, S. 652–663.
- [Gol-2014] Golle, U.; Rothlauf, F.; Boysen, N.: Car sequencing versus mixed-model sequencing: A computational study. In: European Journal of Operational Research, Jg. 237 (2014) Nr. 1, S. 50–61.
- [Goo-2016] Goodfellow, I.; Bengio, Y.; Courville, A.: Deep learning. Adaptive computation and machine learning. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts und London, England, 2016. <https://www.deeplearningbook.org/>, Aufruf am 8.6.2024.
- [Gre-2020] Greif, T.; Stein, N.; Flath, C. M.: Peeking into the void: Digital twins for construction site logistics. In: Computers in Industry, Jg. 121 (2020), S. 103264.
- [Gri-2016] Grieves, M.; Vickers, J.: Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In: Kahlen, F.-J.; Flumerfelt, S.; Alves, A. C. (Hrsg.): Transdisciplinary perspectives on complex systems. Springer International Publishing, Cham, Schweiz, 2016, S. 85–114.
- [Gru-1993] Gruber, T. R.: A translation approach to portable ontology specifications. In: Knowledge Acquisition, Jg. 5 (1993) Nr. 2, S. 199–220.
- [Gsc-2021] Gschwendtner, C.; Fischer, A.; Fottner, J.; Tommelein, I. D.: Evaluating Supply-And Reverse Logistics Alternatives in Building Construction Using Simulation. In: Winter Simulation Conference (WSC). IEEE, 2021, S. 1–12.
- [Gün-2000] Günther, H.-O.; Tempelmeier, H.: Produktion und Logistik. 4. Aufl. Springer, Berlin und Heidelberg, 2000.
- [Gün-2008] Günthner, W. A.; Zimmermann, J.: Logistik in der Bauwirtschaft: Status Quo, Handlungsfelder, Trends und Strategien. 2008.
- [Gün-2009] Günthner, W. A.; Kessler, S.; Frenz, T.; Wimmer, J.: Transportlogistikplanung im Erdbau – Forschungsbericht des IGF-Vorhabens 15073N der Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V. Abschlussbericht. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, 2009.

- [Gün-2010] Günthner, W. A.; Rank, E.; Vogt, N.; Euringer, T.; Stockbauer, W.; Hartmann, E.; Hirzinger, G.: ForBau - Virtuelle Baustelle - Digitale Werkzeuge für die Bauplanung und -abwicklung. Abschlussbericht. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, 2010.
- [Gün-2011] Günthner, W.; Borrmann, A. (Hrsg.): Digitale Baustelle - innovativer Planen, effizienter Ausführen: Werkzeuge und Methoden für das Bauen im 21. Jahrhundert. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2011.
- [Gün-2015] Günthner, W. A.; Borrmann, A.: FAUST – Fertigungssynchrone Ablaufsimulation von Unikatbaustellen im Spezialtiefbau. Abschlussbericht. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, 2015.
- [Gün-2016a] Günther, T.; Billot, N.; Schuster, J.; Schnell, J.; Spingler, F. B.; Gasteiger, H. A.: The Manufacturing of Electrodes: Key Process for the Future Success of Lithium-Ion Batteries. In: Advanced Materials Research, Jg. 1140 (2016), S. 304–311.
- [Gün-2016b] Günthner, W. A.: Entwicklung einer agentenbasierten Methodik zur Terminplanoptimierung im Bauwesen unter Berücksichtigung ressourcenabhängiger Prozesslängen. DFG-Abschlussbericht. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, 2016.
- [Gün-2016c] Günthner, W. A.; Vogel-Heuser, B.: BauFlott – Entwicklung eines Flottenmanagementsystems für Baumaschinen. Abschlussbericht. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, 2016.
- [Gün-2016d] Günthner, W. A.; Wenzler, F.: Entwicklung einer agentenbasierten Methodik zur Terminplanoptimierung im Bauwesen unter Berücksichtigung ressourcenabhängiger Prozesslängen: GU 427/22-1. Abschlussbericht. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, 2016.
- [Gut-2017] Gutenschwager, K.; Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: Simulation in Produktion und Logistik: Grundlagen und Anwendungen. Springer Vieweg, Berlin, 2017.
- [Haj-1999] Hajjar, D.; AbouRizk, S.: Symphony: an environment for building special purpose construction simulation tools. In: Winter Simulation Conference (WSC). 2. 1999, S. 998–1006.
- [Haj-2015] Hajba, T.; Horváth, Z.: MILP models for the optimization of real production lines. In: Central European Journal of Operations Research, Jg. 23 (2015) Nr. 4, S. 899–912.
- [Hal-1973] Halpin, D. W.: An investigation of the use of simulation networks for modeling construction operations. 1973.

-
- [Hal-1977] Halpin, D. W.: Cyclone–Method for Modeling Job Site Processes. In: Journal of the Construction Division, Jg. 103 (1977) Nr. 3, S. 489–499.
- [Hal-1992] Halpin, D. W.; Riggs, L. S.: Planning and analysis of construction operations. Wiley, New York, NY, USA, 1992.
- [Har-2020] Haronian, E.; Sacks, R.: ROADELS: discrete information objects for production planning and control of road construction. In: Journal of Information Technology in Construction, Jg. 25 (2020), S. 254–271.
- [Har-2021] Harichandran, A.; Raphael, B.; Mukherjee, A.: A hierarchical machine learning framework for the identification of automated construction. In: Journal of Information Technology in Construction, Jg. 26 (2021), S. 591–623.
- [HDB-2015] HDB Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V. (Hrsg.): BGL Baugeräteliste 2015: Technisch-wirtschaftliche Baumaschinendaten. 1. Aufl. 2015. Baugeräteliste. Bauverl., Gütersloh, 2015. <http://www.bgl-online.info/>,
- [HDB-2017] HDB Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V.: BIM im Spezialtiefbau: Technisches Positionspapier der Bundesfachabteilung Spezialtiefbau im Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V. Hrsg. von Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V. 2017.
- [Hei-2016] Heinonen, A.; Seppänen, O.: Takt Time Planning: Lessons for Construction Industry from a Cruise Ship Cabin Refurbishment Case Study. In: 23rd Annual Conference of the International Group for Lean Construction, (2016).
- [Hen-2016] Henze, N.: Stochastik für Einsteiger: Eine Einführung in die faszinierende Welt des Zufalls. 11. Aufl. Springer Spektrum, Wiesbaden, 2016.
- [Her-2021] Herzog, A.: Simulation mit dem Warteschlangensimulator: Mathematische Modellierung und Simulation von Produktions- und Logistikprozessen. Studienbücher Wirtschaftsmathematik. Springer Gabler, Wiesbaden und Heidelberg, 2021.
- [Hoc-1997] Hochreiter, S.; Schmidhuber, J.: Long short-term memory. In: Neural computation, Jg. 9 (1997) Nr. 8, S. 1735–1780.
- [Hof-2002] Hoffmann, M.; Krause, T. (Hrsg.): Zahlentafeln für den Baubetrieb: Mit 637 Bildern und 62 Beispielen. 6. Aufl. Teubner, Stuttgart, 2002.
- [Höö-2008] Höök, M.; Stehn, L.: Applicability of lean principles and practices in industrialized housing production. In: Construction Management and Economics, Jg. 26 (2008) Nr. 10, S. 1091–1100.
- [Hor-2012] Horenburg, T.; Wimmer, J.; Günthner, W. A.: Resource Allocation in Construction Scheduling based on Multi-Agent Negotiation. In: Proceedings of the 14th Int. Conference on Computing in Civil & Building Engineering, Jg. 14 (2012).

- [Hor-2014] Horenburg, T.: Simulationsgestützte Ablaufplanung unter Berücksichtigung aktueller Baufortschrittsinformationen. Dissertation. Lehrstuhl für Förder-technik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, 2014.
- [Hu-2022] Hu, W.; Lim, K. Y. H.; Cai, Y.: Digital Twin and Industry 4.0 Enablers in Building and Construction: A Survey. In: Buildings, Jg. 12 (2022) Nr. 11, S. 2004.
- [IBM-2021] IBM Corp.: TCP/IP TCP, UDP, and IP protocols. 2021. <https://www.ibm.com/docs/en/zos/2.2.0?topic=internets-tcpip-tcp-udp-ip-protocols>, Aufruf am 14.12.2022.
- [IBM-2023] IBM Cloud Education: REST APIs. 2023. <https://www.ibm.com/cloud/learn/rest-apis>, Aufruf am 25.6.2023.
- [ISO-15143-3] ISO Internationale Organisation für Normung: Earth-moving machinery and mobile road construction machinery — Worksite data exchange: Part 3: Telematics data. ISO, Nr. 15143-3, 2016.
- [ISO-19510] ISO Internationale Organisation für Normung: Informationstechnik - Object Management Group Geschäftsprozessmodell und Notation: Part 3: Telematics data. ISO/IEC, Nr. 19510, 2013.
- [Jaz-2020] Jazzar, M. E.; Urban, H.; Schranz, C.; Nassereddine, H.: A roadmap to shaping the future of construction. In: Proceedings of the 37th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, ISARC 2020: From Demonstration to Practical Use - To New Stage of Construction Robot, Jg. 37 (2020).
- [Jur-2024] Juraboev, A.; Díaz, J.: Embedding RFID Tags into Precast Structural Components for Tracking and Holistic Real-Time Lean Construction Management. In: Skatulla, S.; Beushausen, H. (Hrsg.): Advances in Information Technology in Civil and Building Engineering. 357. Lecture Notes in Civil Engineering. Springer International Publishing, Cham, Schweiz, 2024, S. 703–711.
- [Kag-2013] Kagermann, H.; Wahlster, W.; Helbig, J.: Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort sichern. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0. Hrsg. von Hellinger, A.; Stumpf, V. Berlin [u.a.], 2013.
- [Kan-2000] Kannan, G.; Vorster, M.: Development of an Experience Database for Truck Loading Operations. In: Journal of Construction Engineering and Management, Jg. 126 (2000) Nr. 3, S. 201–209.

-
- [Kar-2015] Kargul, A.; Günthner, W. A.; Bügler, M.; Borrmann, A.: Web based field data analysis and data-driven simulation application for construction performance prediction. In: Journal of Information Technology in Construction, Jg. 20 (2015), S. 479–494.
- [Kar-2021] Kargul, A.: Entwicklung eines Baumaschinenmanagements zur integrativen und adaptiven Steuerung des Maschinenbestandes über den Lebenszyklus. Dissertation. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, 2021.
- [Kas-2017] Kasote, S.; Das, S.; Rao, S.: Adoption of Structural Analysis Capabilities in an IOT Based Scenario for Connected Assets. In: Bernhaupt, R.; Dalvi, G.; Joshi, A.; K. Balkrishan, D.; O'Neill, J.; Winckler, M. (Hrsg.): Human-Computer Interaction – INTERACT 2017. Springer International Publishing, Cham, Schweiz, 2017, S. 332–335.
- [Kha-2015] Khaitan, S. K.; McCalley, J. D.: Design Techniques and Applications of Cyberphysical Systems: A Survey. In: IEEE Systems J, Jg. 9 (2015) Nr. 2, S. 350–365.
- [Kim-2018] Kim, H.; Bang, S.; Jeong, H.; Ham, Y.; Kim, H.: Analyzing context and productivity of tunnel earthmoving processes using imaging and simulation. In: Automation in Construction, Jg. 92 (2018), S. 188–198.
- [Kim-2019] Kim, S.; Choi, J.-H.: Convolutional neural network for gear fault diagnosis based on signal segmentation approach. In: Structural Health Monitoring, Jg. 18 (2019) Nr. 5-6, S. 1401–1415.
- [Kin-2013] King, D. H.; Harrison, H. S.: Open-source simulation software “JaamSim”. In: Winter Simulation Conference (WSC). IEEE, 2013, S. 2163–2171.
- [Kir-2012] Kirchbach, K.; Bregenhorn, T.; Gehbauer, F.; Tommelein, I. D.; Pasquire, C. L.: Digital Allocation of Production Factors in Earth Work Construction. In: 20th Annual Conference of the International Group for Lean Construction, (2012).
- [Kla-2008] Klaus, P.; Krieger, W. (Hrsg.): Gabler Lexikon Logistik: Management logistischer Netzwerke und Flüsse. 4. Aufl. Gabler Lexikon. Gabler, Wiesbaden, 2008.
- [Kle-2023] Kleiner, J.: Ein Beitrag zur Entwicklung von Baustellenversorgungssystemen. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, 2023.
- [Koc-2018] Kochendörfer, B.; Liebchen, J. H.; Viering, M. G.: Bau-Projekt-Management. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2018.
- [Köh-2005] Köhler, T.; Lorenz, D.: A comparison of denoising methods for one dimensional time series: Technical Report DFG SPP 1114. Technischer Bericht. Zentrum für Technomathematik, Universität Bremen, 2005.

- [Koh-2024] Kohl, M.: Kompetenzmanagement für Logistikmitarbeitende in der Industrie 4.0. Dissertation. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, 2024.
- [Kön-2007] König, M.; Beißert, U.; Bargstädt, H.-J.: Visual simulation: an appropriate approach to support execution planning in building engineering. In: 7th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality (CONVR). Penn State University, University Park, PA, USA, 2007, S. 189–197.
- [Kön-2014] König, H. (Hrsg.): Maschinen im Baubetrieb: Grundlagen und Anwendung. 4. Aufl. Leitfaden des Baubetriebs und der Bauwirtschaft. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014.
- [Kön-2015] König, M.; Rank, E.; Bletzinger, K.-U.; Borrmann, A.; Smarsly, K.; Huhnt, W.: Aktuelle Entwicklungen und Herausforderungen der Bauinformatik. In: Der Bauingenieur, Jg. 90 (2015) Nr. 7/8.
- [Kos-1992] Koskela, L.: Application of the New Production Philosophy to Construction. Technischer Bericht. Stanford University, 1992.
- [Kos-2000] Koskela, L.: An exploration towards a production theory and its application to construction. Dissertation. Helsinki University of Technology, 2000.
- [Kos-2024] Kosse, S.; Pawlowski, D.; König, M.: Industry 4.0-Based Digital Twin Approach for Construction Site Tracking Purposes. In: Skatulla, S.; Beushausen, H. (Hrsg.): Advances in Information Technology in Civil and Building Engineering. 357. Lecture Notes in Civil Engineering. Springer International Publishing, Cham, Schweiz, 2024, S. 671–686.
- [Kra-2005] Krauß, S.: Die Baulogistik in der schlüsselfertigen Ausführung. Dissertation. Institut für Baubetriebslehre, Universität Stuttgart, 2005.
- [Kri-2018] Kritzinger, W.; Karner, M.; Traar, G.; Henjes, J.; Sihn, W.: Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. In: IFAC-PapersOnLine, Jg. 51 (2018) Nr. 11, S. 1016–1022.
- [Kud-2000] Kudlich, T.: Optimierung von Materialflußsystemen mit Hilfe der Ablaufsimulation. Dissertation. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, 2000.
- [Kug-2012] Kugler, M.: CAD-integrierte Modellierung von agentenbasierten Simulationsmodellen für die Bauablaufsimulation im Hochbau. Dissertation. Institut für Bauwirtschaft, Universität Kassel, 2012.
- [Kuh-2017] Kuhn, T.: Digitaler Zwilling. In: Informatik-Spektrum, Jg. 40 (2017) Nr. 5, S. 440–444.

-
- [Las-2014] Lasi, H.; Fettke, P.; Kemper, H.-G.; Feld, T.; Hoffmann, M.: Industry 4.0. In: Business & Information Systems Engineering, Jg. 6 (2014) Nr. 4, S. 239–242.
- [Law-2013] Law, A. M.: Simulation modeling and analysis. Fifth edition. McGraw-Hill series in industrial engineering and management science. McGraw-Hill Education, Dubuque, 2013.
- [LeC-2015] LeCun, Y.; Bengio, Y.; Hinton, G.: Deep learning. In: Nature, Jg. 521 (2015) Nr. 7553, S. 436–444.
- [Lee-2013] Lee, S.; Behzadan, A.; Kandil, A.; Mohamed, Y.: Grand Challenges in Simulation for the Architecture, Engineering, Construction, and Facility Management Industries. In: Computing in Civil Engineering. American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 2013, S. 773–785.
- [Lee-2017] Lee, J.; Jin, C.; Liu, Z.: Predictive Big Data Analytics and Cyber Physical Systems for TES Systems. In: Advances in through-life engineering services, Decision engineering, 1619-5736, Vol. 46. Springer, Cham, Switzerland, 2017, S. 97–112.
- [Lei-2016] Leite, F.; Cho, Y.; Behzadan, A. H.; Lee, S.; Choe, S.; Fang, Y.; Akhavian, R.; Hwang, S.: Visualization, Information Modeling, and Simulation: Grand Challenges in the Construction Industry. In: Journal of Computing in Civil Engineering, Jg. 30 (2016) Nr. 6.
- [Li-2011] Li, N.; Becerik-Gerber, B.: Performance-based evaluation of RFID-based indoor location sensing solutions for the built environment. In: Advanced Engineering Informatics, Jg. 25 (2011) Nr. 3, S. 535–546.
- [Lie-2023] Liebherr-Werk Nenzing GmbH: Lösungen für den Spezialtiefbau: Drehbohrgeräte, Rammgeräte, Hydroseilbagger. Hrsg. von Liebherr-Werk Nenzing GmbH. 2023. <https://www.liebherr.com/external/brochures/d9e44435-f3a4-4541-921c-ff4df2e6839a-4/liebherr-brosch%c3%bcre-l%c3%b6sungen-f%c3%bcr-den-spezialtiefbau-11948145-de.pdf>, Aufruf am 2.11.2023.
- [Lin-2013] Lindén, S.; Josephson, P.-E.: In-housing or out-sourcing on-site materials handling in housing? In: Journal of Engineering, Design and Technology, Jg. 11 (2013) Nr. 1, S. 90–106.
- [Lip-1999] Lipsmeier, K.; Ghabel, M.: Abfallmanagementsysteme in der baubetrieblichen Praxis: Der recyclingorientierte Baustellenbetrieb für den Hochbau. In: Bautechnik, Jg. 75 (1999) Nr. 5, S. 362–367.
- [Lip-2004] Lipsmeier, K.: Abfallkennzahlen für Neubauleistungen im Hochbau: Hochbaukonstruktionen und Neubauvorhaben im Hochbau nach abfallwirtschaftlichen Gesichtspunkten. Dissertation. Technische Universität Dresden, 2004.

- [Liu-2017] Liu, X.; Wang, X.; Wright, G.; Cheng, J.; Li, X.; Liu, R.: A State-of-the-Art Review on the Integration of Building Information Modeling (BIM) and Geographic Information System (GIS). In: ISPRS International Journal of Geo-Information, Jg. 6 (2017) Nr. 2, S. 53.
- [Liu-2020] Liu, C.; AbouRizk, S.; Morley, D.; Lei, Z.: Data-Driven Simulation-Based Analytics for Heavy Equipment Life-Cycle Cost. In: Journal of Construction Engineering and Management, Jg. 146 (2020) Nr. 5.
- [Lou-2016] Louis, J.: Simulation analysis, monitoring, and control of operations. Dissertation. Purdue University, 2016.
- [Lou-2017] Louis, J.; Dunston, P. S.: Methodology for real-time monitoring of construction operations using finite state machines and discrete-event operation models. In: Journal of Construction Engineering and Management, Jg. 143 (2017) Nr. 3.
- [Lou-2018] Louis, J.; Dunston, P. S.: Integrating IoT into operational workflows for real-time and automated decision-making in repetitive construction operations. In: Automation in Construction, Jg. 94 (2018), S. 317–327.
- [Lun-2017] Lundberg, S.; Lee, S.-I.: A Unified Approach to Interpreting Model Predictions. In: 31st Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2017), Jg. 31 (2017).
- [Mad-2022] Madubuike, O. C.; Anumba, C. J.; Khallaf, R.: A review of digital twin applications in construction. In: Journal of Information Technology in Construction, Jg. 27 (2022), S. 145–172.
- [Mai-2017] Maier, J.: Made Smarter Review. 2017. <https://www.gov.uk/government/publications/made-smarter-review>, Aufruf am 13.1.2024.
- [Mar-1994] Martinez, J. C.; Ioannou, P. G.: General purpose simulation with Stroboscope. In: Proceedings of Winter Simulation Conference 1994. IEEE, 1994, S. 1159–1166.
- [Mar-2001] Martinez, J. C.: EZStrobe-general-purpose simulation system based on activity cycle diagrams. In: Proceeding of the 2001 Winter Simulation Conference (Cat. No.01CH37304). IEEE, 2001, S. 1556–1564.
- [Mar-2010] Martinez, J. C.: Methodology for Conducting Discrete-Event Simulation Studies in Construction Engineering and Management. In: Journal of Construction Engineering and Management, Jg. 136 (2010) Nr. 1, S. 3–16.
- [Max-2021] Max Bögl Modul AG: The room module - an industrial building system. 2021. <https://www.maxmodul.de/en/maxmodul/room-module>, Aufruf am 2.9.2021.

-
- [Max-2023] Max Bögl Modul AG: Bildquelle. 2023. https://www.maxmodul.de/images/content/a_kurze_bauzeiten.jpg, Aufruf am 20.10.2023.
- [McK-2016] McKinsey & Company: Imagining construction's digital future. 2016. <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/imagining-constructions-digital-future>, Aufruf am 29.12.2022.
- [McK-2017] McKinsey Global Institute: Reinventing Construction: A route to higher productivity. 2017. www.mckinsey.com/mgi, Aufruf am 24.12.2024.
- [McK-2019] McKinsey & Company: Modular construction: From projects to products. Hrsg. von McKinsey & Company. 2019. <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/modular-construction-from-projects-to-products>, Aufruf am 21.10.2023.
- [Mel-2023] Melo, V.; La Prieta, F. de; Leitão, P.: Alignment of Digital Twin Systems with the RAMI 4.0 Model Using Multi-agent Systems. In: Borangiu, T.; Trentesaux, D.; Leitão, P. (Hrsg.): Service Oriented, Holonic and Multi-Agent Manufacturing Systems for Industry of the Future. 1083. Studies in Computational Intelligence. Springer International Publishing, Cham, Schweiz, 2023, S. 23–35.
- [Mon-2014] Montaser, A.; Ibrahim, M.; Moselhi, O.: Adaptive forecasting in earthmoving operation using DES and site captured data. In: Procedia Engineering, Jg. 85 (2014).
- [Mos-2016] Mostafa, S.; Chileshe, N.; Abdelhamid, T.: Lean and agile integration within offsite construction using discrete event simulation. In: Construction Innovation, Jg. 16 (2016) Nr. 4, S. 483–525.
- [Mou-2021] El Moussaoui, S.; Lafhaj, Z.; Leite, F.; Fléchar, J.; Linéatte, B.: Construction Logistics Centres Proposing Kitting Service: Organization Analysis and Cost Mapping. In: Buildings, Jg. 11 (2021) Nr. 3, S. 105.
- [Mül-2011] Müller-Benedict, V.: Grundkurs Statistik in den Sozialwissenschaften: Eine leicht verständliche, anwendungsorientierte Einführung in das sozialwissenschaftlich notwendige statistische Wissen. 5. Aufl. Lehrbuch. VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden, 2011.
- [Mül-2017] Müller, A. C.; Guido, S.: Introduction to machine learning with Python: A guide for data scientists. First edition. O'Reilly Media, Sebastopol, CA, 2017.
- [Nie-2003] Nielsen, J.: Information Modeling of Manufacturing Processes: Information Requirements for Process Planning in A Concurrent Engineering Environment. Dissertation. KTH ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY, 2003.

- [Nüb-2015] Nübel, K.; Geiss, A.; Sommer, F.; Pielmeier, M.; Heinrich, M.; Rehfeld, B.: Produktionsplanung und Produktionssteuerung im Spezialtiefbau [Production planning and production control in special foundation engineering]: Prozessorientierter Ablauf von Bauprojekten im Spezialtiefbau. In: Bauingenieur, VDI Bautechnik, (2015) Nr. Jahresausgabe 2015/2016, S. 101–107.
- [Ock-2019] Ocker, F.; Vogel-Heuser, B.; Paredis, C. J. J.: Applying Semantic Web Technologies to Provide Feasibility Feedback in Early Design Phases. In: Journal of Computing and Information Science in Engineering, Jg. 19 (2019) Nr. 4.
- [Oes-2016] Oesterreich, T. D.; Teuteberg, F.: Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry. In: Computers in Industry, Jg. 83 (2016), S. 121–139.
- [Ohn-1988] Ohno, T.: Toyota production system: beyond large-scale production. Productivity Press. Portland, Oregon, 1988.
- [Ola-2021] Olanipekun, A. O.; Sutrisna, M.: Facilitating Digital Transformation in Construction—A Systematic Review of the Current State of the Art. In: Frontiers in Built Environment, Jg. 7 (2021).
- [Omr-2023] Omrany, H.; Al-Obaidi, K. M.; Husain, A.; Ghaffarianhoseini, A.: Digital Twins in the Construction Industry: A Comprehensive Review of Current Implementations, Enabling Technologies, and Future Directions. In: Sustainability, Jg. 15 (2023) Nr. 14, S. 10908.
- [Ord-2016] Ordóñez, F. J.; Roggen, D.: Deep Convolutional and LSTM Recurrent Neural Networks for Multimodal Wearable Activity Recognition. In: Sensors (Basel, Switzerland), Jg. 16 (2016) Nr. 1.
- [Oso-2021] Osorio-Sandoval, C. A.; Tizani, W.; Pereira, E.; Koch, C.; Fadoul, A.: Discrete-Event Simulation and Building Information Modelling Based Animation of Construction Activities. 98. Springer, 2021.
- [Ott-2007] Ott, M.: Fertigungssystem Baustelle: Ein Kennzahlensystem zur Analyse und Bewertung der Produktivität von Prozessen. Dissertation. Institut für Technologie und Management im Baubetrieb, Karlsruher Institut für Technologie, 2007.
- [Pan-2023a] Panahi, R.; Louis, J.; Podder, A.; Pless, S.; Swanson, C.; Jafari, M.: Automated Progress Monitoring in Modular Construction Factories Using Computer Vision and Building Information Modeling. In: Proceedings of the 40th

-
- International Symposium on Automation and Robotics in Construction. International Association for Automation and Robotics in Construction (IAARC), 2023.
- [Pan-2023b] Panahi, R.; Louis, J.; Podder, A.; Swanson, C.; Pless, S.: Bottleneck Detection in Modular Construction Factories Using Computer Vision. In: Sensors (Basel, Switzerland), Jg. 23 (2023) Nr. 8.
- [Ped-2012] Pedregosa, F.; Varoquaux, G.; Gramfort, A.; Michel, V.; Thirion, B.; Grisel, O.; Blondel, M.; Müller, A.; Nothman, J.; Louppe, G.; Prettenhofer, P.; Weiss, R.; Dubourg, V.; Vanderplas, J.; Passos, A.; Cournapeau, D.; Brucher, M.; Perrot, M.; Duchesnay, É.: Scikit-learn: Machine Learning in Python. In: (2012), S. 2826–2830.
- [Per-2022] Perno, M.; Hvam, L.; Haug, A.: Implementation of digital twins in the process industry: A systematic literature review of enablers and barriers. In: Computers in Industry, Jg. 134 (2022), S. 103558.
- [Pet-1962] Petri, C. A.: Kommunikation mit Automaten. Dissertation. Technischen Hochschule Darmstadt, 1962.
- [Pia-2010] Piascik, R.; Vickers, J.; Lowry, D.; Scotti, S.; Stewart, J.; Calomino, A.: Technology Area 12: Materials, Structures, Mechanical Systems, and Manufacturing Roadmap. 2010.
- [Pin-2009] Pinedo, M. L.: Planning and scheduling in manufacturing and services. 2. Aufl. Springer, New York, NY und Heidelberg, 2009.
- [Plo-1964] Plowman, E. G.: Lectures on elements of business logistics. Vorlesung. Graduate School of Business, Stanford University, 1964.
- [Pos-2016] Poshdar, M.; González, V. A.; O’Sullivan, M.; Shahbazzpour, M.; Walker, C. G.; Golzarpoor, H.: The Role of Conceptual Modeling in Lean Construction Simulation. In: 23rd Annual Conference of the International Group for Lean Construction, (2016).
- [Pro-2019] Profanter, S.; Tekat, A.; Dorofeev, K.; Rickert, M.; Knoll, A.: OPC UA versus ROS, DDS, and MQTT: Performance Evaluation of Industry 4.0 Protocols. In: IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). 2019, S. 955–962.
- [PWC-2016] PWC PricewaterhouseCoopers GmbH Wirtschaftsprüfungsgesellschaft: Industry 4.0: Building the digital enterprise. 2016. <https://www.pwc.com/gx/en/industries/industries-4.0/landing-page/industry-4.0-building-your-digital-enterprise-april-2016.pdf>, Aufruf am 26.5.2023.

- [Qil-2010] Qilin, L.; Mintian, Z.: The State of the Art in Middleware. In: International Forum on Information Technology and Applications (IFITA 2010). 1. 2010, S. 83–85.
- [Qui-1992] Quinlan, J. R.: C4.5: Programs for Machine Learning. 1. Aufl. Morgan Kaufmann, 1992.
- [Rab-2008] Rabe, M.; Spiekermann, S.; Wenzel, S.: Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik: Vorgehensmodelle und Techniken. VDI-Buch. Springer, Berlin und Heidelberg, 2008.
- [Rad-2017] Rademacher, F.; Sachweh, S.; Zündorf, A.: Differences between Model-Driven Development of Service-Oriented and Microservice Architecture. In: IEEE International Conference on Software Architecture Workshops (ICSAW). 2017, S. 38–45.
- [Ras-2019] Rashid, K. M.; Louis, J.: Times-series data augmentation and deep learning for construction equipment activity recognition. In: Advanced Engineering Informatics, Jg. 42 (2019), S. 100944.
- [Ras-2020] Rashid, K. M.; Louis, J.: Automated Activity Identification for Construction Equipment Using Motion Data From Articulated Members. In: Frontiers in Built Environment, Jg. 5 (2020).
- [Ras-2021a] Rashid, K. M.: Automated Monitoring of Construction Operations for Data-Driven Decision Making. Dissertation. Oregon State University, 2021.
- [Ras-2021b] Rashid, K. M.; Louis, J.: Automated Active and Idle Time Measurement in Modular Construction Factory Using Inertial Measurement Unit and Deep Learning for Dynamic Simulation Input. In: Winter Simulation Conference (WSC). IEEE, 2021, S. 1–8.
- [Ras-2022] Rashid, K. M.; Louis, J.: Integrating Process Mining with Discrete-Event Simulation for Dynamic Productivity Estimation in Heavy Civil Construction Operations. In: Algorithms, Jg. 15 (2022) Nr. 5, S. 173.
- [Rat-2003] Ratzer, A. V.; Wells, L.; Lassen, H. M.; Laursen, M.; Qvortrup, J. F.; Stissing, M. S.; Westergaard, M.; Christensen, S.; Jensen, K.: CPN Tools for Editing, Simulating, and Analysing Coloured Petri Nets. In: Applications and Theory of Petri Nets 2003. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2003, S. 450–462.
- [REF-1991] REFA - Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V.: Planung und Steuerung. 1. Aufl. 1. Methodenlehre der Betriebsorganisation. Hanser, München, 1991.
- [Rob-2011] Robinson, S.: Conceptual Modeling for Simulation. In: Cochran, J. J.; Cox, L. A.; Keskinocak, P.; Kharoufeh, J. P.; Smith, J. C. (Hrsg.): Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science. Wiley, 2011.

-
- [Rob-2015] Robinson, S.: A tutorial on conceptual modeling for simulation. In: Winter Simulation Conference (WSC). IEEE, 2015, S. 1820–1834.
- [Ros-1958] Rosenblatt, F.: The perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain. In: Psychological review, Jg. 65 (1958) Nr. 6, S. 386–408.
- [Ros-2015] Rosen, R.; Wichert, G. von; Lo, G.; Bettenhausen, K. D.: About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing. In: IFAC-PapersOnLine, Jg. 48 (2015) Nr. 3, S. 567–572.
- [Rot-2009] Rother, M.; Shook, J.: Learning to see: Value-stream mapping to create value and eliminate muda. Version 1.4. Shingo Prize for excellence in manufacturing. Lean Enterprise Institute, Cambridge, Massachusetts, USA, 2009.
- [Rud-2022] Rudolph, L.; Pantforder, D.; Palmas, F.; Fischer, M.; Niermann, P.; Klinker, G.; Vogel-Heuser, B.: Maintenance in Process Industries with Digital Twins and Mixed Reality: Potentials, Scenarios and Requirements. In: IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). IEEE, 2022, S. 474–481.
- [Sac-2020] Sacks, R.; Brilakis, I.; Pikas, E.; Xie, H. S.; Girolami, M.: Construction with digital twin information systems. In: Data-Centric Engineering, Jg. 1 (2020).
- [Sam-2013] Samkari, K.; Franz, V.: A petri net-based simulation model for the flexible modelling and analysis of building construction processes. In: Simulation in Produktion und Logistik Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung. 2013.
- [San-2022a] Santos, C. H. d.; Montevechi, J. A. B.; Queiroz, J. A. de; Carvalho Miranda, R. de; Leal, F.: Decision support in productive processes through DES and ABS in the Digital Twin era: a systematic literature review. In: International Journal of Production Research, Jg. 60 (2022) Nr. 8, S. 2662–2681.
- [San-2022b] Santos, C. H. d.; Queiroz, J. A. de; Leal, F.; Montevechi, J. A. B.: Use of simulation in the industry 4.0 context: Creation of a Digital Twin to optimise decision making on non-automated process. In: 1747-7778, Jg. 16 (2022) Nr. 3, S. 284–297.
- [San-2023a] Santos, C. H. d.; Campos, A. T.; Montevechi, J. A. B.; Carvalho Miranda, R. de; Costa, A. F. B.: Digital Twin simulation models: a validation method based on machine learning and control charts. In: International Journal of Production Research, (2023), S. 1–17.

- [San-2023b] Santos, C. H. d.; Campos, A. T.; Montevechi, J. A. B.; Carvalho Miranda, R. de; do Amaral, J. V. S.; Queiroz, J. A. de: Simulation-based digital twins monitoring: an approach focused on models' accreditation. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Jg. 124 (2023) Nr. 7-8, S. 2423–2435.
- [Sch-1993] Schmenner, R. W.: Production/operations management: From the inside out. 5. ed. Macmillan, New York, NY, USA, 1993.
- [Sch-2011] Scherer, R.; Ismail, A.: Process-based simulation library for construction project planning. In: Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference (WSC). IEEE, 2011, S. 3488–3499.
- [Sch-2014a] Scherer, R. J.; Schapke, S.-E. (Hrsg.): Informationssysteme im Bauwesen 1: Modelle, Methoden und Prozesse. VDI. Springer Berlin Heidelberg and Imprint: Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2014.
- [Sch-2014b] Scherer, R. J.; Schapke, S.-E. (Hrsg.): Informationssysteme im Bauwesen 2: Anwendungen. VDI-Buch. Springer Vieweg, Berlin, 2014.
- [Sch-2015] Schümann, D.: Plowman: Die „Seven Rights of Logistics“, ihr Autor und ihre Geschichte. Hrsg. von Logistik Initiative Schleswig-Holstein e.V. 2015. <https://logish.egeb.de/wp-content/uploads//PlowmanBuch.pdf>, Aufruf am 28.7.2024.
- [Sch-2016] Schluse, M.; Rossmann, J.: From simulation to experimentable digital twins: Simulation-based development and operation of complex technical systems. In: IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE). IEEE, 2016, S. 1–6.
- [Sch-2019] Schacht, S.; Lanquillon, C. (Hrsg.): Blockchain und maschinelles Lernen: Wie das maschinelle Lernen und die Distributed-Ledger-Technologie voneinander profitieren. Springer Vieweg, Berlin und Heidelberg, 2019.
- [Sch-2020a] Schöberl, M.; Cai, Z.; Fischer, A.; Kessler, S.: Current Research and Developments for Civil Engineering in Germany. In: Current Trends in Civil & Structural Engineering, Jg. 5 (2020) Nr. 1.
- [Sch-2020b] Schweigert-Recksiek, S.; Trauer, J.; Engel, C.; Spreitzer, K.; Zimmermann, M.: Conception of a Digital Twin in Mechanical Engineering – A Case Study in Technical Product Development. In: Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference, Jg. 1 (2020), S. 383–392.
- [Sch-2022] Schlenger, J.; Yeung, T.; Vilgertshofer, S.; Martinez, J.; Sacks, R.; Borrmann, A.: A Comprehensive Data Schema for Digital Twin Construction. In: Proceedings of the 29th EG-ICE International Workshop on Intelligent Computing in Engineering. EG-ICE, 2022, S. 34–44.

-
- [Sch-2025] Schöberl, M.: Automation in Construction: Developing Value-creating Robotic Systems and Digital Services (noch nicht veröffentlicht). Dissertation. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, 2025.
- [Sen-2018] Sensor-Technik Wiedemann GmbH: Telematik revolutioniert den Markt für mobile Arbeitsmaschinen. 2018. <https://www.stw-mobile-machines.com/case-studies/detail/bauer/>, Aufruf am 5.11.2023.
- [Sey-2007] Seyedzadegan, M.; Othman, M.; Subramaniam, S.; Zukarnain, Z.: The TCP fairness in WLAN. In: IEEE International Conference on Telecommunications and Malaysia International Conference on Communications (ICT-MICC). IEEE, 2007, S. 644–648.
- [Sha-2019] Shahinmoghadam, M.; Motamedi, A.: Review of BIM-centred IoT deployment: State of the art, opportunities, and challenges. In: Proceedings of the 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Jg. 36 (2019).
- [She-2019] Sherafat, B.; Rashidi, A.; Lee, Y.-C.; Ahn, C. R.: Automated Activity Recognition of Construction Equipment Using a Data Fusion Approach. In: Computing in Civil Engineering. 2019, S. 1–8.
- [She-2020] Sherafat, B.; Ahn, C. R.; Akhavian, R.; Behzadan, A. H.; Golparvar-Fard, M.; Kim, H.; Lee, Y.-C.; Rashidi, A.; Azar, E. R.: Automated Methods for Activity Recognition of Construction Workers and Equipment: State-of-the-Art Review. In: Journal of Construction Engineering and Management, Jg. 146 (2020) Nr. 6, S. 1–19.
- [Shi-1988] Shingō, S.; Bodek, N.: Non-stock production: The Shingo system for continuous improvement. Productivity Press, Cambridge, Massachusetts, 1988.
- [Shr-2019] Shrestha, A.; Mahmood, A.: Review of Deep Learning Algorithms and Architectures. In: IEEE Access, Jg. 7 (2019), S. 53040–53065.
- [Sie-2019] Siemens Industry Software, Inc.: Tecnomatix Plant Simulation Help: Exchanging Data via a Network Socket. 2019.
- [Sil-2012] Silva, M.: 50 years after the PhD thesis of Carl Adam Petri: A perspective. In: IFAC Proceedings Volumes, Jg. 45 (2012) Nr. 29, S. 13–20.
- [Sla-2020] Slaton, T.; Hernandez, C.; Akhavian, R.: Construction activity recognition with convolutional recurrent networks. In: Automation in Construction, Jg. 113 (2020), S. 103138.
- [Sol-2009] Solding, P.; Gullander, P.: Concepts for simulation based Value Stream Mapping. In: Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Austin, Texas, USA, 2009, S. 2231–2237.

- [Son-2012] Song, L.; Eldin, N. N.: Adaptive real-time tracking and simulation of heavy construction operations for look-ahead scheduling. In: *Automation in Construction*, Jg. 27 (2012), S. 32–39.
- [Son-2017] Song, Y.; Wang, X.; Tan, Y.; Wu, P.; Sutrisna, M.; Cheng, J.; Hampson, K.: Trends and Opportunities of BIM-GIS Integration in the Architecture, Engineering and Construction Industry: A Review from a Spatio-Temporal Statistical Perspective. In: *ISPRS International Journal of Geo-Information*, Jg. 6 (2017) Nr. 12, S. 397.
- [Son-2019] Soni, R.; Tanmay, D.; Twinkle; Bhatia, M.: Digital Twin: Intersection of Mind and Machine. In: *International Journal of Computational Intelligence & IoT (IJCIIoT)*. 2019, S. 667–670.
- [Sta-2008a] Statista Statistisches Bundesamt: Klassifikation der Wirtschaftszweige: Gliederung der Klassifikation der Wirtschaftszweige, Ausgabe 2008 (WZ 2008). 2008.
- [Sta-2008b] Statistische Systematik der Wirtschaftszweige in der Europäischen Gemeinschaft: Eurostat – RAMON – Nomenclature Detail View – Code: F. 2008. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/metadata/classifications>, Aufruf am 24.12.2024.
- [Sta-2018] Stark, R.; Damerau, T.; Lindow, K.: Industrie 4.0—Digital Redesign of Product Creation and Production in Berlin as an Industrial Location. In: Sendler, U. (Hrsg.): *The Internet of Things*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2018, S. 171–186.
- [Sta-2021] Statistisches Bundesamt: Kleine und mittlere Unternehmen erzielten rund 78 Prozent des Umsatzes im Bau- und Gastgewerbe. 2021. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Unternehmen/Kleine-Unternehmen-Mittlere-Unternehmen/aktuell-umsatz.html>, Aufruf am 6.4.2024.
- [Sta-2022] Statista Statistisches Bundesamt: Umsatzentwicklung im Bauhauptgewerbe in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2022. Hrsg. von Statista. 2022. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/154592/umfrage/umsatz-im-bauhauptgewerbe-seit-2000/>, Aufruf am 29.12.2022.
- [Ste-2006] Steinhauer, D.: Simulation im Schiffbau – Unterstützung von Werftplanung, Produktionsplanung und Produktentwicklung bei der Flensburger Schiffbau-Gesellschaft. In: Wenzel, S. (Hrsg.): *Simulation in Produktion und Logistik*. 12. ASIM Fachtagung. SCS Publishing House, Erlangen, 2006, S. 1–14.

-
- [Ste-2010] Steinhauer, D.; König, M.: Konzepte zum effektiven Aufbau von Simulationsmodellen für die Unikatproduktion: Concepts for Effective Simulation Modelling of One-of-a-kind Production. In: Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal, (2010), S. 157–164.
- [Stu-1998] Studer, R.; Benjamins, V.; Fensel, D.: Knowledge engineering: Principles and methods. In: Data & Knowledge Engineering, Jg. 25 (1998) Nr. 1-2, S. 161–197.
- [Stu-2021] Studer, S.; Bui, T. B.; Drescher, C.; Hanuschkin, A.; Winkler, L.; Peters, S.; Müller, K.-R.: Towards CRISP-ML(Q): A Machine Learning Process Model with Quality Assurance Methodology. In: Machine Learning and Knowledge Extraction, Jg. 3 (2021) Nr. 2, S. 392–413.
- [Tao-2018] Tao, F.; Cheng, J.; Qi, Q.; Zhang, M.; Zhang, H.; Sui, F.: Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Jg. 94 (2018) Nr. 9-12, S. 3563–3576.
- [Tao-2019] Tao, F.; Sui, F.; Liu, A.; Qi, Q.; Zhang, M.; Song, B.; Guo, Z.; Lu, S. C.-Y.; Nee, A. Y. C.: Digital twin-driven product design framework. In: International Journal of Production Research, Jg. 57 (2019) Nr. 12, S. 3935–3953.
- [Tho-1989] Thomas, H. R.; Sanvido, V. E.; Sanders, S. R.: Impact of Material Management on Productivity—A Case Study. In: Journal of Construction Engineering and Management, Jg. 115 (1989) Nr. 3, S. 370–384.
- [Tho-2005] Thomas, H. R.; Riley, D. R.; Messner, J. I.: Fundamental Principles of Site Material Management. In: Journal of Construction Engineering and Management, Jg. 131 (2005) Nr. 7, S. 808–815.
- [Thö-2015] Thönes, J.: Microservices. In: IEEE Software, Jg. 32 (2015) Nr. 1, S. 116.
- [Tho-2020] Thommen, J.-P.; Achleitner, A.-K.; Gilbert, D. U.; Hachmeister, D.; Jarchow, S.; Kaiser, G.: Allgemeine Betriebswirtschaftslehre: Umfassende Einführung aus managementorientierter Sicht. 9. Aufl. Lehrbuch. Springer Gabler, Wiesbaden und Heidelberg, 2020.
- [Tia-2010] Tian, Y.; Geiger, J. V.; Su, H.; Kumar, S. V.; Houser, P. R.: Middleware-Based Sensor Web Integration. In: IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, Jg. 3 (2010) Nr. 4, S. 467–472.
- [Tom-1994] Tommelein, I. D.; Carr, R. I.; Odeh, A. M.: Knowledge-based assembly of simulation networks using construction designs, plans, and methods. In: Proceedings of Winter Simulation Conference 1994. IEEE, 1994, S. 1145–1152.

- [Tom-1999] Tommelein, I. D.; Riley, D. R.; Howell, G. A.: Parade Game: Impact of Work Flow Variability on Trade Performance. In: Journal of Construction Engineering and Management, Jg. 125 (1999) Nr. 5, S. 304–310.
- [Tom-2000] Tommelein, I. D.: Impact of Variability and Uncertainty on Product and Process Development. In: Construction Congress VI. American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 2000, S. 969–976.
- [Tra-2020a] Trauer, J.; Schweigert-Recksiek, S.; Engel, C.; Spreitzer, K.; Zimmermann, M.: What is a digital twin? Definitions and insights from an industrial case study in technical product development. In: Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference, Jg. 1 (2020), S. 757–766.
- [Tra-2020b] Trauer, J.; Schweigert-Recksiek, S.; Onuma Okamoto, L.; Spreitzer, K.; Mörtl, M.; Zimmermann, M.: Data Driven Engineering – Definition and Insights from an Industrial Case Study. In: Proceedings of NordDesign 2020, (2020).
- [Tue-2011] Tuegel, E. J.; Ingrassia, A. R.; Eason, T. G.; Spottswood, S. M.: Reengineering Aircraft Structural Life Prediction Using a Digital Twin. In: International Journal of Aerospace Engineering, Jg. 2011 (2011), S. 1–14.
- [Tuh-2023] Tuhaise, V. V.; Tah, J. H. M.; Abanda, F. H.: Technologies for digital twin applications in construction. In: Automation in Construction, Jg. 152 (2023), S. 1–19.
- [Tur-1950] Turing, A. M.: Computing Machinery and Intelligence. In: Mind, Jg. 59 (1950) Nr. 236, S. 433–460.
- [Ung-2016] Ungurean, I.; Gaitan, N. C.; Gaitan V.G.: A Middleware Based Architecture for the Industrial Internet of Things. In: KSII Trans. on Internet & Inform. Syst. Jg. 10 (2016) Nr. 7, S. 2874–2891.
- [VDI-2021] VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V.: Industrie 4.0 – Begriffe/Terms. 2021. <https://www.vdi.de/ueber-uns/presse/publikationen/details/industrie-40-begriffeterms>, Aufruf am 19.12.2022.
- [VDI-2023] VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V.: Neue VDI-Richtlinie (2555) definiert Anforderungen an die Baulogistik. 2023. <https://www.vdi-wissensforum.de/news/neue-vdi-richtlinie-2555-definiert-anforderungen-an-die-baulogistik/>, Aufruf am 4.8.2023.
- [VDI-2553] VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V.: Lean Construction. VDI-Richtlinie, Nr. 2553, 2019.
- [VDI-2871] VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V.: Ganzheitliche Produktionssysteme: Führung. VDI-Richtlinie, Nr. 2871 - Blatt 1, 2017.

-
- [VDI-3633] VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V.: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen: Grundlagen. VDI-Richtlinie, Nr. 3633 - Blatt 1, 2014.
- [VDI-3682] VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V.: Formalisierte Prozessbeschreibung: Konzept und grafische Darstellung. VDI-Richtlinie, Nr. 3682 Blatt 1, 2015.
- [VDM-2018] VDMA Software und Digitalisierung: Machine Learning im Maschinen- und Anlagenbau. Quick Guide. 2018. <https://www.vdma.org/documents/34570/1052572/Quick-Guide%20Machine%20Learning%20KI.pdf/8021ab42-79a6-5c72-c4f6-20b6c49ad54a>, Aufruf am 24.12.2024.
- [Ver-2021] Verhoef, P. C.; Broekhuizen, T.; Bart, Y.; Bhattacharya, A.; Qi Dong, J.; Fabian, N.; Haenlein, M.: Digital transformation: A multidisciplinary reflection and research agenda. In: Journal of Business Research, Jg. 122 (2021), S. 889–901.
- [Vog-2021] Vogel-Heuser, B.; Ocker, F.; Weiß, I.; Mieth, R.; Mann, F.: Potential for combining semantics and data analysis in the context of digital twins. In: Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences, Jg. 379 (2021) Nr. 2207, S. 20200368.
- [Vog-2024] Vogel-Heuser, B.; Hartl, F.; Wittemer, M.; Zhao, J.; Mayr, A.; Fleischer, M.; Prinz, T.; Fischer, A.; Trauer, J.; Schröder, P.; Goldbach, A.-K.; Rothmeyer, F.; Zimmermann, M.; Bletzinger, K.-U.; Fottner, J.; Daub, R.; Bengler, K.; Borrmann, A.; Zäh, M. F.; Wudy, K.: Long living human-machine systems in construction and production enabled by digital twins. In: at - Automatisierungstechnik, Jg. 72 (2024) Nr. 9, S. 789–814.
- [Voi-2014] Voigtmann, J. K.: Simulation bauleistungslogistischer Prozesse im Ausbau. Dissertation. Bauhaus Universität Weimar, 2014.
- [Wac-2020] Wackerl, M.: Auswertung von Bohrgerätedaten und Einflussfaktoren beim Kelly-Verfahren im Seeton: Am Beispiel des Bauvorhabens Westtangent Rosenheim. Bachelorarbeit. Hochschule München, 2020.
- [Wan-1995] Wang, R. Y.; Storey, V. C.; Firth, C. P.: A framework for analysis of data quality research. In: IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, Jg. 7 (1995) Nr. 4, S. 623–640.
- [Web-2007] Weber, J.: Simulation von Logistikprozessen auf Baustellen auf Basis von 3D-CAD Daten. Dissertation. Universität Dortmund, 2007.
- [Wen-2016a] Wenzler, F.: Multi-Agenten-System zur Terminplanoptimierung im Bauwesen mit gemeinsam genutzten Ressourcen. In: Logistic Journal: Proceedings, (2016).

- [Wen-2016b] Wenzler, F.; Günthner, W. A.: A Learning Agent for a Multi-Agent System for Project Scheduling in Construction. In: 30th European Conference on Modelling and Simulation (ECMS 2016). 2016, S. 11–17.
- [Wic-2020] Wickramasekara, A. N.; Gonzalez, V. A.; O’Sullivan, M.; Walker, C. G.; Poshdar, M.; Ying, F.: Exploring the Integration of Last Planner System, Bim, and Construction Simulation. In: Proc. 28th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC). International Group for Lean Construction, 2020, S. 1057–1068.
- [Wim-2014] Wimmer, J.: Ereignisorientierte Simulation und Optimierung im Erdbau. Dissertation. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, 2014.
- [Wri-2020] Wright, L.; Davidson, S.: How to tell the difference between a model and a digital twin. In: Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences, Jg. 7 (2020) Nr. 1.
- [Xu-2019] Xu, C.; Chai, D.; He, J.; Zhang, X.; Duan, S.: InnoHAR: A Deep Neural Network for Complex Human Activity Recognition. In: IEEE Access, Jg. 7 (2019), S. 9893–9902.
- [Yeu-2022] Yeung, T.; Martinez, J.; Sharoni, L.; Sacks, R.: The Role of Simulation in Digital Twin Construction. In: Proceedings of the 29th EG-ICE International Workshop on Intelligent Computing in Engineering. EG-ICE, 2022, S. 248–258.
- [You-2004] Young, A.: Construction logistics: Models for consolidation. Constructing Excellence, London, 2004.
- [Zhu-2004] Zhu, X.; Wu, X.: Class Noise vs. Attribute Noise: A Quantitative Study. In: Artificial Intelligence Review, (2004) Nr. 22, S. 177–210.
- [Züb-2020] Züblin AG Ed.: Produktvorstellung Xitavis: Baustellen Online-Avisierung. Hrsg. von Ed Züblin AG. 2020.

Verzeichnis betreuter Studienarbeiten

Im Zusammenhang mit der Dissertation wurden die nachfolgenden Studienarbeiten von der Autorin betreut. Die Anfertigung der Arbeiten wurden durch die Autorin wissenschaftlich und inhaltlich angeleitet.

Development and implementation of an intelligent database concept for market analysis in special foundation

Masterarbeit von Lucas Hauser [fml-2019]

Markt- und Nutzeranalyse zur Digitalisierung der Baustelle

Semesterarbeit von Shangyu Ji [fml-2020]

Aufbereitung von historischen Maschinendaten auf Basis von Verteilungsfunktionen am Beispiel des Kellybohrverfahrens

Semesterarbeit von Alexander Schiegg [fml-2020b]

Optimierung der ein- und ausgehenden Logistikströme durch Echtzeit-Konnektivität und Standortintelligenz

Masterarbeit von Henrik Buck [fml-2020c]

Entwicklung eines ereignisorientierten Simulationsmodells zur Einbindung von realen Baustellendaten im Austausch mit dem Terminplan

Semesterarbeit von Zhuoran Li [fml-2020d]

Entwicklung eines Konzepts für eine Webapplikation unter Einbeziehung von Maschinendaten

Bachelorarbeit von Hassen Smida [fml-2020e]

Analyse des aktuellen Stands der ereignisdiskreten Simulation im Bauwesen und Entwicklung einer Simulationsstudie anhand eines konkreten Fallbeispiels

Masterarbeit von Shangyu Ji [fml-2020f]

Implementation of a middleware to connect machine data from an external platform and a simulation tool

Interdisziplinäres Projekt von Gokulakrishnan Balakrishnan [fml-2020g]

Development of an Application for Usage and Visualization of Process Simulation in Construction Projects: Entwicklung eines webbasierten Tools zur Nutzung und Visualisierung von Prozesssimulation im Bauwesen

Interdisziplinäres Projekt von Katharina Schmitt [fml-2020h]

**Analyse von Maschinendaten im Spezialtiefbau mit Hilfe von Maschinellem Lernen:
Analysis of Machine Data in Special Foundation Engineering using Machine Learning**
Semesterarbeit von Moxi Liang [fml-2020i]

Analyse zur Aktivitätserkennung bei Baumaschinen unter Anwendung von Machine Learning
Masterarbeit von Valeri Orschlet [fml-2020j]

Analyse der aktuellen Grundlagen zur digitalen Leistungsermittlung von Baumaschinen
Bachelorarbeit von Niklas Grimm [fml-2020k]

Analyse des aktuellen Stands der ereignisdiskreten Simulation im Bauwesen
Masterarbeit von Rongqian Li [fml-2020l]

Anwendung von künstlichen neuronalen Netzen zur Analyse von Maschinendaten
Semesterarbeit von Haokun Bi [fml-2020m]

Development and Analysis of Process Simulation in Building Construction
Masterarbeit von Christina Gschwendtner [fml-2021]

Development of a web interface to display and edit machine data
Interdisziplinäres Projekt von Bernhard Stöckl [fml-2021b]

Entwicklung eines Simulationsmodells zur Integration und Analyse von Erdbewegungsdaten: Development of a simulation model for the integration and analysis of earthmoving data
Semesterarbeit von Xiaoxin Zhu [fml-2021c]

Entwicklung einer ereignisdiskreten Simulation auf Basis von BIM
Masterarbeit von Shuo Ma [fml-2021d]

Erweiterung des zyklischen Ansatzes zur Kombination von Mikrosimulation und Makrosimulation
Masterarbeit von Zhuoran Li [fml-2021e]

Equipment data-based activity recognition of construction machinery
Bachelorarbeit von Alexandre Beiderwellen Bedrikow [fml-2021f]

Holistic Optimization of a Modular Building Production Plant using Discrete-Event Simulation
Masterarbeit von Jorge Rodriguez Llorens [fml-2021g]

Extension of a middleware by IoT systems and additional machine systems
Interdisziplinäres Projekt von Yuling Sun [fml-2022]

Development of a visualizing 3D Application for Construction Machine Data: Entwicklung eines Unity Front-Ends für einen Demonstrator im Spezialtiefbau

Interdisziplinäres Projekt von Altan Kesan [fml-2022b]

Verwendung einer Ablaufsimulation als Basis eines digitalen Zwillings eines Tiefbauprojekts

Semesterarbeit von Philipp Baumgartner [fml-2022c]

Application of the Work Density Method to Special Foundation Engineering

Masterarbeit von Philipp Baumgartner [fml-2023]

Simulationsbasierte Untersuchungen zur Datenintegration für den Digitalen Zwilling in der Baulogistik: Simulation-based Studies on Data Integration for the Digital Twin in Construction Logistics

Bachelorarbeit von Niklas Grimm [fml-2023b]

Studentische Hilfskräfte Folgende studentische Hilfskräfte haben, zum Teil über Studienarbeiten hinausgehend, zusätzlich mitgearbeitet (chronologisch gelistet):

- Bayram Ahmadov
- Alexandre Beiderwellen Bedrikow
- Raphaela Capistrano
- Niklas Grimm
- Yidi Huang
- Jorge Rodriguez Llorens
- Zhuoran Li
- Shuo Ma
- Michael Schneider
- Yuling Sun
- Dominik Herrmann
- Ziping Cong
- Robinson Nyotta
- Jovana Aleksic

Die Autorin dankt allen Studierenden, die im Rahmen ihrer Studienarbeiten und/oder hilfswissenschaftlichen Tätigkeiten zur Entstehung dieser Dissertation beigetragen haben, herzlich für ihre Arbeit und ihren Einsatz.

Verzeichnis der Veröffentlichungen

Current Research and Developments for Civil Engineering in Germany

Konferenzbeitrag von Maximilian Schöberl, Zhen Cai, Anne Fischer, Stephan Kessler
Current Research and Developments for Civil Engineering in Germany. Current Trends in Civil & Structural Engineering 5 (1), 2020 [Sch-2020a]

Begleitende Prozesssimulation für das Kellybohrverfahren [Accompanying process simulation for the Kelly drilling process]

Konferenzbeitrag mit Tagungsbeitrag von Anne Fischer, Gokulakrishnan Balakrishnan, Stephan Kessler, Johannes Fottner
8. Fachtagung Baumaschinentechnik 2020, Dresden [Fis-2020]

Equipment data-based activity recognition of construction machinery

Konferenzbeitrag mit Tagungsbeitrag von Anne Fischer, Alexandre Beiderwellen Bedrikow, Stephan Kessler, Johannes Fottner
2021 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC), IEEE, 2021, Cardiff, Vereinigtes Königreich [Fis-2021c]

Evaluating Supply-And Reverse Logistics Alternatives in Building Construction Using Simulation

Konferenzbeitrag mit Tagungsbeitrag von Christina Gschwendtner, Anne Fischer, Iris D. Tommelein, Stephan Kessler, Johannes Fottner
2021 Winter Simulation Conference, 2021, Phoenix, Arizona, USA [Gsc-2021]

Importance of secondary processes in heavy equipment resource scheduling using hybrid simulation

Konferenzbeitrag mit Tagungsbeitrag von Anne Fischer, Zhuoran Li, Stephan Kessler, Johannes Fottner
38th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2021), 2021, Dubai, Vereinigte Emirate [Fis-2021e]

Cyclic Update of Project Scheduling by Using Telematics Data

Konferenzbeitrag mit Tagungsbeitrag von Anne Fischer, Zhuoran Li, Florian Wenzler, Stephan Kessler, Johannes Fottner
17th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, 2021, Budapest, Ungarn [Fis-2021a]

Integrating BIM for DES-based resource scheduling: A validation for pile drilling production

Konferenzbeitrag mit Tagungsbeitrag von Anne Fischer, Shuo Ma, Stephan Kessler, Johannes Fottner

38th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2021), 2021, Dubai, Vereinigte Emirate [Fis-2021f]

Detecting Equipment Activities by Using Machine Learning Algorithms

Konferenzbeitrag mit Tagungsbeitrag von Anne Fischer, Moxi Liang, Valeri Orschlet, Haokun Bi, Stephan Kessler, Johannes Fottner

17th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, 2021, Budapest, Ungarn [Fis-2021b]

Variety in Variability in Heavy Civil Engineering

Konferenzbeitrag mit Tagungsbeitrag von Anne Fischer, Niklas Grimm, Iris D. Tommelein, Stephan Kessler, Johannes Fottner

Proceedings of the 29th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC29), 2021, Lima, Peru [Fis-2021d]

Implementation of a digital twin framework in the modular housing industry

Konferenzbeitrag mit Tagungsbeitrag von Anne Fischer, Jorge Rodriguez Llorens, Zhen Cai, Michael Wilke, Stephan Kessler, Johannes Fottner

2022 IEEE 28th ICE/ITMC & 31st IAMOT Joint Conference IEEE, 2022, Nantes, Frankreich [Fis-2022]

Microservice-Based Middleware for a Digital Twin of g Equipment-Intensive Construction Processes

Konferenzbeitrag mit Tagungsbeitrag von Anne Fischer, Yuling Sun, Stephan Kessler, Johannes Fottner

40th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2023), 2023, Chennai, Indien [Fis-2023b]

From Activity Recognition to Simulation: The Impact of Granularity on Production Models in Heavy Civil Engineering

Zeitschriftenbeitrag von Anne Fischer, Alexandre Beiderwellen Bedrikow, Iris D. Tommelein, Konrad Nübel, Johannes Fottner

Algorithms 2023, Heft 4 von 16, S. 212ff [Fis-2023a]

Construction Logistics – An Underrated Topic and an Educational Gap in University Teaching

Konferenzbeitrag von Anne Fischer, Michael Schneider, Zhen Cai, Klaus Lipsmeier, Alexander

Hochrein, Johannes Fottner

Construction Logistics, Equipment, and Robotics (CLEaR 2023), 2023, Raitenhaslach [Fis-2024]

Long living human-machine systems in construction and production enabled by digital twins

Zeitschriftenbeitrag von Birgit Vogel-Heuser, Fandi Hartl, Moritz Wittemer, Jingyun Zhao, Andreas Mayr, Martin Fleischer, Theresa Prinz, Anne Fischer, Jakob Trauer, Philipp Schröder, Ann-Kathrin Goldbach, Florian Rothmeyer, Markus Zimmermann, Kai-Uwe Bletzinger, Johannes Fottner, Rüdiger Daub, Klaus Bengler, André Borrmann, Michael F. Zäh, Katrin Wudy

at – Automatisierungstechnik, Heft 9 von 72, S. 789–814, 2024 [Vog-2024]

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1	Übersicht auf die Bauindustrie übertragenen Industrie 4.0-Begriffe (eigene Darstellung nach [Fis-2023b])	1
Abbildung 1-2	Ergebnisse der Umfrage in [Bec-2023, S. 19–67] zur Anwendung von digitalen Technologien im Unternehmen (74 Teilnehmende; eigene Darstellung)	4
Abbildung 1-3	Planung, Betrieb und Kontrolle des Bauproduktionssystems als Regelkreis (orange: bau-spezifische Randbedingungen; grün: geringer Grad an Digitalisierung; eigene Darstellung nach [Gün-2011, S. 161])	7
Abbildung 1-4	Aufbau der Arbeit (eigene Darstellung)	9
Abbildung 2-1	Betrachtungsgegenstand dieser Arbeit: Die Baulogistik und ihre Ebenen, eingeordnet in die verschiedenen Bauphasen (eigene Darstellung nach [Gün-2011, S. 205 f.; Voi-2014, S. 10])	12
Abbildung 2-2	Bauproduktionssystem (blau), ergänzt um digitale Technologien (grün) (eigene Darstellung nach [Kir-2012])	16
Abbildung 2-3	Konzeptionelle Struktur des Digitalen Zwillings (eigene Darstellung nach [Vog-2024])	23
Abbildung 2-4	Integration des Digitalen Zwillings in RAMI 4.0 (eigene Darstellung nach [Vog-2024] zitiert nach [Bro-2010; DIN-91345; Mel-2023]) . . .	24
Abbildung 2-5	Schematische Darstellung verschiedener TaT- und Sensorsysteme zur Datensammlung (eigene Darstellung)	28
Abbildung 2-6	Schematische Darstellung eines dreilagigen ANN-Modells (eigene Darstellung nach [fml-2021f])	32
Abbildung 2-7	Schematische Darstellung von Punkt-zu-Punkt-Topologie vs. Middleware-System (eigene Darstellung)	35

Abbildung 3-1	Schematische Darstellung der Bestandteile der ereignisorientierten Simulation: Prozess, Aktivität und Ereignis (eigene Darstellung nach [Ele-2012])	40
Abbildung 3-2	Evolution der ereignisorientierten Simulation zum Digitalen Zwilling in der Baulogistik (eigene Darstellung)	43
Abbildung 3-3	Klassifizierungsproblem bei der Modellierung der Aktivitätserkennung auf Grundlage von [Har-2021; Akh-2015b] (weiß: LoD1; hellblau: LoD2; blau: LoD3; eigene Darstellung nach [Fis-2023a])	56
Abbildung 4-1	Vorgehensmodell für den Digitalen Zwilling in der Baulogistik (eigene Darstellung)	67
Abbildung 4-2	Bau-Produkt-Prozess-Ressourcen-Modell auf Grundlage von Nielsen [Nie-2003] (blaue Schwimmbahnen), ergänzt um baulogistische Vorgänge inkl. Materialflüsse (grün: Versorgung; orange: Entsorgung; grau: Qualitätskontrolle), Aktivitäten und zugehörige digitale Technologien zur Datensammlung (grüne Schwimmbahnen)	71
Abbildung 4-3	Einordnung der drei Anwendungsbeispiele in die Evolutionsstufen des Digitalen Zwillings (eigene Darstellung)	75
Abbildung 5-1	Bausteine für den Digitalen Zwilling im Modulbau (blau: umgesetzt; weiß: konzeptioniert; eigene Darstellung)	77
Abbildung 5-2	Baustein für die Modellierung des Digitalen Zwillings im Modulbau (blau; eigene Darstellung)	79
Abbildung 5-3	Modul (eigene Darstellung nach [Fis-2022]; Bildrechte: Max Bögl Modul AG [Max-2021; Max-2023])	79
Abbildung 5-4	Möglichkeiten für die Belegung der Schmetterlinge mit den verschiedenen Bauteilen (blau: Böden; orange: Längs- bzw. Innenwände; grün: Querwände; eigene Darstellung nach [Fis-2022])	80
Abbildung 5-5	Wertstromanalyse für die betrachtete Produktionsstätte (blau: Produktion; grün: Versorgung; eigene Darstellung nach [fml-2021g])	81

Abbildung 5-6	Schematische Darstellung der Stationen und der Materialflüsse bezogen auf die Schmetterlinge (blaue Pfeile), die Bauteile (grüne Pfeile) und die Module (orangene Pfeile) (eigene Darstellung nach [Fis-2022; fml-2021g])	82
Abbildung 5-7	Schematische Verdeutlichung der Modulreihenfolge: Werden zwei Bad-Module hintereinander produziert, kommt es zum Nichteinhalten der Taktzeit (eigene Darstellung nach [fml-2021g])	84
Abbildung 5-8	Baustein für die Implementierung des Digitalen Zwillings im Modulbau (blau; eigene Darstellung)	86
Abbildung 5-9	Ausschnitt des implementierten Simulationslayout des Produktionssystems (eigene Darstellung nach [fml-2021g])	87
Abbildung 5-10	Auslastungsdiagramm des Produktionssystems (eigene Darstellung nach [fml-2021g])	90
Abbildung 5-11	Durchschnittliche Durchlauf- und Wartezeit der Schmetterlinge in der Rohbaulinie (eigene Darstellung nach [fml-2021g])	90
Abbildung 5-12	Vergleich des Bestands an Schmetterlingen im Puffer der Rohbaulinie (eigene Darstellung nach [fml-2021g])	91
Abbildung 5-13	Boxplot-Diagramm der Pufferbelegung pro Bauteil zur Validierung der Simulation (Abkürzung zu QW: Querwand, LW: Längswand, BIW-K/L: Betoninnenwand-Kurz/Lang; eigene Darstellung nach [fml-2021g]) .	92
Abbildung 5-14	Durchschnittliche Durchlauf- und Wartezeiten in der Montagelinie (eigene Darstellung nach [fml-2021g])	92
Abbildung 5-15	Durchsatz der Module pro Tag (eigene Darstellung nach [fml-2021g])	93
Abbildung 5-16	Baustein für die Datensammlung am Digitalen Zwilling im Modulbau (blau; eigene Darstellung)	94

Abbildung 5-17 Versuchsaufbau zur Datensammlung von Warte- und Durchlaufzeit der Doppelwände: (1) aufgeklebter RFID-Tag auf der Doppelwand; (2a) gegenüberliegende Lesegeräte am Eingang der Station; (2b) Lesegerät am Ausgang der Station; (3) Verbundener Rechner zum Auslesen des Zeitstempels (eigene Darstellung nach [fml-2021g])	95
Abbildung 5-18 BPPR-Modell für die Messung der Bearbeitungszeit der Doppelwand für die Montage mit Hilfe von RFID (grün: Versorgung; orange: Entsorgung; grau: Qualitätskontrolle; eigene Darstellung)	96
Abbildung 5-19 Baustein für die Durchführung der Experimente am Digitalen Zwilling im Modulbau (blau; eigene Darstellung)	97
Abbildung 5-20 Durchschnittliche Durchlauf- und Wartezeiten in der Montagelinie (eigene Darstellung nach [fml-2021g])	98
Abbildung 5-21 Durchsatz der Module pro Tag (eigene Darstellung nach [fml-2021g])	98
Abbildung 5-22 Abhängigkeit der Anzahl der eingesetzten Schmetterlinge auf die durchschnittliche Durchlauf- und Wartezeit in der Rohbaulinie in Tagen (primäre vertikale Achse) und auf den prozentualen Anteil der Wartezeit bei der Ausschalung (sekundäre vertikale Achse) (eigene Darstellung nach [fml-2021g])	99
Abbildung 5-23 Vergleich des Bestands an Schmetterlingen im Puffer der Rohbaulinie (eigene Darstellung nach [fml-2021g])	100
Abbildung 5-24 Auslastungsdiagramme für die Schalungslinie (Schalung), die Betonierstation (Betonage), die Doppelwand (DW)-Station und die Montagelinie (Montage) bei einer Bearbeitungszeit für die Doppelwand von 2 h (Referenzmodell), 3 h und 4 h (eigene Darstellung nach [fml-2021g])	101
Abbildung 6-1 Bausteine für den Digitalen Zwilling im Hochbau (blau: umgesetzt; weiß: konzeptioniert; eigene Darstellung)	103
Abbildung 6-2 Baustein für die Modellierung des Digitalen Zwillings am Hochbauprojekt 1 und 2 (blau; eigene Darstellung)	105

Abbildung 6-3	Wertstromanalyse für die Ver- und Entsorgung der Hochbauprojekte 1 und 2 (blau: Produktion; grün: Versorgung; orange: Entsorgung; Abkürzung zu BL: Bauleitung, G(L): Gewerk(sleitung), LDL-G/H/M: LDL mit Gabelstapler, Hubwagen, Mülltonne; eigene Darstellung)	106
Abbildung 6-4	Seitenansicht für die schematische Darstellung des Materialflusses für die Hochbauprojekte 1 und 2 (grün: Versorgung; orange: Entsorgung; eigene Darstellung nach [Boe-2006; fml-2021; Voi-2014])	107
Abbildung 6-5	Draufsicht für die schematische Darstellung des Materialflusses im Erd- und Regelgeschoss für die Hochbauprojekte 1 und 2 (grün: Versorgung; orange: Entsorgung; eigene Darstellung nach [Boe-2006; fml-2021; Voi-2014])	107
Abbildung 6-6	Baustein für die Implementierung des Digitalen Zwillings am Hochbauprojekt 1 (blau; eigene Darstellung)	112
Abbildung 6-7	Ausschnitt des implementierten Simulationslayouts für das EG [fml-2021]	115
Abbildung 6-8	Ausschnitt des implementierten Simulationslayouts für ein Regelgeschoss [fml-2021]	116
Abbildung 6-9	Ausschnitt des implementierten Simulationslayouts für einen Taktbereich in den Regelgeschossen [fml-2021]	116
Abbildung 6-10	Simulationslogik (eigene Darstellung nach [fml-2021])	117
Abbildung 6-11	Versorgungslogik (eigene Darstellungen nach [fml-2021])	118
Abbildung 6-12	Produktions- und Entsorgungslogik für die Materialverarbeitung in den Taktbereichen (eigene Darstellung nach [fml-2021])	119
Abbildung 6-13	Geräteverwaltung: Aufgaben des LKW's (eigene Darstellung nach [fml-2021])	120
Abbildung 6-14	Personalverwaltung: Aufgabenverwaltung beim LDL-Personal (eigene Darstellung nach [fml-2021])	121
Abbildung 6-15	Baustein für die Datensammlung des Digitalen Zwillings am Hochbauprojekt 2 (blau; eigene Darstellung)	123

Abbildung 6-16 Bau-Produkt-Prozess-Ressourcen-Modell mit Fokus auf der Anlieferung für ein Gewerk mit Hilfe der Avisierungssoftware im Hochbauprojekt 2 (grün: Versorgung; orange: Entsorgung; grau: Qualitätskontrolle; eigene Darstellung)	124
Abbildung 6-17 Baustein für die Datenaufbereitung des Digitalen Zwillings am Hochbauprojekt 2 (blau; eigene Darstellung)	125
Abbildung 6-18 Vergleich der Anzahl an ankommenden LKWs für das Hochbauprojekt 2 (eigene Darstellung nach [fml-2023b])	126
Abbildung 6-19 Baustein für die Durchführung des Experiments am Digitalen Zwilling des Hochbauprojekts 1 (blau; eigene Darstellung)	128
Abbildung 6-20 Ergebnisse der Simulation für das Referenzmodell am Hochbauprojekt 1 mit dem JIT-Ansatz im Vergleich zum Experiment mit dem Kitting-Ansatz (eigene Darstellung nach [Gsc-2021])	129
Abbildung 7-1 Umgesetzte Bausteine für den Digitalen Zwilling im Spezialtiefbau (eigene Darstellung)	134
Abbildung 7-2 Baustein für die Modellierung des Digitalen Zwillings im Spezialtiefbau (blau: hervorgehoben; eigene Darstellung)	135
Abbildung 7-3 Beispielhaftes Bohrgerät zur Darstellung relevanter Bauteilkomponenten (weiß ausgefüllte Markierungen) und Sensoren zur Datensammlung (schwarz ausgefüllte Markierungen): (1) Unterwagen; (2) Oberwagen (Pumpendrucke); (3) Hauptwinde (Seilkraft, Geschwindigkeit und Werkzeugtiefe); (4) Hilfswinde (Seilkraft); (5) Versorgungswinde (Seilkraft); (6) Kinematik; (7) Mäkler bzw. Mast (Mastneigung); (8) Mastkopf; (9) Kellystange; (10) Kraftdrehkopf (Drehmoment, Geschwindigkeit); (11) Kastenbohrer; (12) Schneckenbohrer; (13) Verrohrung; (14) Bohrschuh (Bildrechte links: Bauer AG [BAU-2023], mittig und rechts: eigene Bilder und Darstellung nach [Fis-2021d; Fis-2023a])	136

Abbildung 7-4	Wertstromanalyse für das Kellybohrverfahren (blau: Produktion; grau: Qualitätskontrolle; grün: Versorgung; orange: Entsorgung; Abkürzung zu BL: Bauleitung; P: Polier*in; BH: Bohrhelfer*in; BF: Bohrgeräteführer*in; BH-R: Bohrhelfer*in mit Radlader; eigene Darstellung nach [Fis-2021d].	138
Abbildung 7-5	Dauer der Teilprozesse Bohren (blau) und Betonieren (grün) inkl. lineare Regression (durchgezogene Linien) für die Bohrpfähle des Spezialtiefbauprojekts in Abhängigkeit ihrer Länge (eigene Darstellung nach [Fis-2023a])	141
Abbildung 7-6	Baustein für die Implementierung des Digitalen Zwillings im Spezialtiefbau (blau; eigene Darstellung)	142
Abbildung 7-7	Teilprozesse des betrachteten Kellybohrverfahrens (blau: Produktion; grün: Versorgung) (eigene Darstellung nach [Fis-2023a])	143
Abbildung 7-8	Baustein für die Datensammlung am Digitalen Zwilling im Spezialtiefbau (blau; eigene Darstellung)	144
Abbildung 7-9	BPPR-Modell mit Fokus auf dem Teilprozess des Bohrens (grün: Versorgung; orange: Entsorgung; grau: Qualitätskontrolle; eigene Darstellung nach [Fis-2023a]; Bildrechte: Bauer AG [BAU-2023]) . .	146
Abbildung 7-10	Baustein für die Datenaufbereitung am Digitalen Zwilling im Spezialtiefbau (blau; eigene Darstellung)	148
Abbildung 7-11	Histogramme für die Tiefe des Werkzeugs (eigene Darstellungen nach [fml-2021f])	150
Abbildung 7-12	SHAP-Wert für die Sensordaten in Abhängigkeit von fünf Aktivitäten: (1) Verrohrung eindrehen, (2) Ablassen, (3) Lösen, (4) Ziehen und (5) Leeren (hervorgehoben: ausgewählte Merkmale aus Varianzfiltermethode; eigene Darstellung nach [Fis-2021b; fml-2020i])	152
Abbildung 7-13	Absolute Werte der Korrelationskoeffizienten für die Sensordaten (eigene Darstellung nach [fml-2021f])	153

Abbildung 7-14 Kreuzvalidierungen für die ML-Modelle hinsichtlich zehn zufällig eingeteilter Trainingsdatensätze und der Genauigkeit ihrer Vorhersage (eigene Darstellungen nach [Fis-2021b; fml-2020i; fml-2020m]) . . .	154
Abbildung 7-15 Lernkurven für die ML-Modelle (eigene Darstellungen nach [Fis-2021b; fml-2020i; fml-2020m])	155
Abbildung 7-16 Konfusionsmatrizen für die ML-Modelle (eigene Darstellungen nach [Fis-2021b; fml-2020i; fml-2020m])	157
Abbildung 7-17 Lernkurven für die DL-Modelle (eigene Darstellungen nach [Fis-2021c; fml-2020i])	160
Abbildung 7-18 Vergleich der Fenstergrößen für das DeepConvBiLSTM-Modell (eigene Darstellung nach [Fis-2021c; fml-2021f])	162
Abbildung 7-19 Übersicht über die LoDs für die hierarchische Klassifizierung (weiß: LoD 1; hellblau: LoD 2; blau: LoD 3; eigene Darstellung nach [Fis-2023a; fml-2021f]; Bildrechte: Bauer AG [BAU-2023])	164
Abbildung 7-20 LoD1-Konfusionsmatrix für DeepConvBiLSTM (eigene Darstellung nach [Fis-2023a; fml-2021f])	165
Abbildung 7-21 LoD2-Konfusionsmatrizen für DeepConvBiLSTM (eigene Darstellungen nach [Fis-2023a; fml-2021f])	167
Abbildung 7-22 LoD3-Konfusionsmatrizen für das DeepConvBiLSTM (eigene Darstellungen nach [Fis-2023a; fml-2021f])	168
Abbildung 7-23 Rohdaten des Bohrgeräts für verschiedene Aktivitäten: (a) „Betonieren“, (b) „Warten auf Beton“ und (c) „Bohren“ (eigene Darstellungen nach [Fis-2023a])	171
Abbildung 7-24 Baustein für die Datenübertragung am Digitalen Zwilling im Spezialtiefbau (blau; eigene Darstellung)	172
Abbildung 7-25 Architekturdiagramm der implementierten Middleware (in Grau: Außerhalb liegende Anwendung bzw. Datenquelle) (eigene Darstellung nach [Fis-2023b; fml-2020g; fml-2022])	173

Abbildung 7-26	Komponenten der Middleware (grau: außerhalb liegende Anwendung bzw. Datenquelle; eigene Darstellung nach [fml-2022])	174
Abbildung 7-27	Baustein für die Durchführung des Experiments am Digitalen Zwilling im Spezialtiefbau (blau; eigene Darstellung)	177
Abbildung 7-28	Ergebnisse der Simulationsläufe: Die Vorhersagen für die Bauzeit nähern sich der tatsächlichen Dauer von 119 Tagen an, je mehr Pfähle produziert werden (eigene Darstellung nach [Fis-2023a])	178
Abbildung 7-29	Kumulative Dauer der Pfahlproduktion während des Spezialtiefbau- projekts: Ist-Zustand (blau) im Vergleich zur Vorhersage der Simulati- onsläufe (grün) auf der Grundlage von (a) 25 %, (b) 50 % und (c) 75 % Ist-Zustand (eigene Darstellung nach [Fis-2023a])	179
Abbildung 7-30	Reihenfolge der Herstellung der Pfähle in Bezug auf ihre Länge (ei- gene Darstellungen nach [Fis-2023a])	179

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1	Herausforderungen der Bauindustrie im Kontext von Industrie 4.0 (eigene Darstellung nach [Bec-2023, S. 19–67; Gün-2011, S. 208 ff.; Hor-2014, S. 4 ff.])	3
Tabelle 2-1	Digitale Technologien und Werkzeuge von Digitalen Zwillingen im Bauwesen (hervorgehoben: relevante Technologien; eigene Darstellung nach [Fen-2021; Oes-2016; Tuh-2023])	27
Tabelle 3-1	Klassifikation relevanter Vorgehensmodelle für die Entwicklung und Integration von simulationsgestützten Digitalen Zwillingen aus dem Bereich der (Bau-)Logistik (eigene Darstellung)	45
Tabelle 3-2	Relevante Forschungsansätze im Bereich Modulbau (eigene Darstellung)	49
Tabelle 3-3	Relevante Forschungsansätze im Bereich Hochbau (eigene Darstellung)	51
Tabelle 3-4	Relevante Forschungsansätze im Bereich Tiefbau (eigene Darstellung)	55
Tabelle 4-1	Eingangsdaten für die Modellierung des Bauproduktionssystems (eigene Darstellung nach [Fei-2016; Gsc-2021])	69
Tabelle 5-1	Eingangsdaten für die Produktionsanlage (eigene Darstellung)	85
Tabelle 6-1	Eingangsdaten für die Hochbauprojekte 1 und 2 (eigene Darstellung) .	110
Tabelle 6-2	Vergleich von Soll- und Ist-Daten für das Hochbauprojekt 2 (eigene Darstellung)	127
Tabelle 7-1	Eingangsdaten für das Spezialtiefbauprojekt (eigene Darstellung) . . .	141
Tabelle 7-2	Sensordaten des Bohrgeräts (hervorgehoben: ausgewählte Merkmale; eigene Darstellung nach [Fis-2021b])	145
Tabelle 7-3	Anzahl der Datenpunkte für die Aktivitätsdaten nach der Gegenüberstellung mit den Sensordaten (eigene Darstellung)	151
Tabelle 7-4	Architektur der für die Parameterstudie verwendeten DL-Modelle (eigene Darstellung nach [Fis-2021c])	159

Tabelle 7-5	Genauigkeit und $F1$ -Wert der implementierten DL-Modelle (eigene Darstellung nach [Fis-2021c])	161
Tabelle 7-6	$F1$ -Werte für die ausgewählten Aktivitäten für LoD1 (eigene Darstellung nach [fml-2021f])	165
Tabelle 7-7	$F1$ -Werte für die ausgewählten Aktivitäten für LoD2 „Arbeit“ (eigene Darstellung nach [fml-2021f])	166
Tabelle 7-8	$F1$ -Werte für die ausgewählten Aktivitäten für LoD2 „Leerlauf“ (eigene Darstellung nach [fml-2021f])	166
Tabelle 7-9	$F1$ -Werte für die ausgewählten Aktivitäten für LoD3 „Bohren“ (eigene Darstellung nach [fml-2021f])	167
Tabelle 7-10	$F1$ -Werte für die ausgewählten Aktivitäten für LoD3 „Bewehren“ (eigene Darstellung nach [fml-2021f])	169
Tabelle 7-11	$F1$ -Werte für die ausgewählten Aktivitäten für LoD3 „Betonieren“ (eigene Darstellung nach [fml-2021f])	169
Tabelle 7-12	$F1$ -Werte für die ausgewählten Aktivitäten für LoD3 „Nebenprozesse“ (eigene Darstellung nach [fml-2021f])	169
Tabelle 7-13	Ergebnisse der Simulationsstudie im Vergleich zur tatsächlichen Herstellungsdauer für die Bohrpfähle des Spezialtiefbauprojekts (eigene Darstellung nach [Fis-2023a])	178
Tabelle 8-1	Vergleich der Anwendungsbeispiele hinsichtlich ihrer Bauproduktionssysteme, Einflüsse und eingesetzter digitaler Technologie für den Digitalen Zwilling (DS: Datensammlung; DA: Datenaufbereitung; DÜ: Datenübertragung; DN: Datennutzung; eigene Darstellung nach [Mos-2016]) . . .	181
Tabelle 8-2	Vergleich der drei Anwendungsbeispiele als Digitale Zwillinge für die Baulogistik (eigene Darstellung)	183
Tabelle 8-3	Morphologischer Kasten für die vorgestellten Digitalen Zwillinge in der Baulogistik (eigene Darstellung)	188

Tabelle 8-4	Einordnung des entwickelten Vorgehensmodells für die Entwicklung und Integration von simulationsgestützten Digitalen Zwillingen für die Baulogistik (eigene Darstellung)	191
-------------	--	-----

A Ergänzungen zu den Grundlagen

Im Rahmen der Anforderungsanalyse im Verbundprojekt Bauen 4.0 führte die Autorin Gespräche mit Expert*innen von drei Bauunternehmen aus dem Spezialtiefbau durch [Bec-2023, S. 28ff]. Die Ergebnisse sind als Organigramm in Abbildung A-1 dargestellt. Sie verdeutlichen die organisatorischen Strukturen und Abläufe innerhalb des Bauprozesses für die Pfahlproduktion.

Die Beteiligung des Bauunternehmens am Bauprojekt beginnt meist erst in der Planungsphase. Zu diesem Zeitpunkt wurden bereits erste Untersuchungen seitens des Auftraggebers in der **Entwurfsphase** durchgeführt, um das Leistungsverzeichnis für die Ausschreibung an das Bauunternehmen zu erstellen. Auf Basis dieses Leistungsverzeichnisses erstellt das Bauunternehmen ein Angebot.

Die Erstellung des **Angebots** erfolgt durch die Kalkulation. Entscheidend sind hierfür die Wahl des Bauverfahrens und der Ressourcen durch den Einkauf. Wurde das Bauunternehmen vom Auftraggeber beauftragt, übernimmt die **Arbeitsvorbereitung** die detailliertere Planung. Zur Arbeitsvorbereitung gehört die Maschinentechnische Abteilung, die die Disposition der Ressourcen übernimmt.

Sowohl Kalkulation als auch Arbeitsvorbereitung arbeiten eng mit dem operativen Bereich zusammen, d. h. Bauleitung und Fachpersonal wie Polier*in, Geräteführer*in oder Bohrhelfer*in. Die Miteinbeziehung ist wichtig, da Entscheidungen auch auf Basis von Erfahrungswerten getroffen werden. Die Datengrundlage sind digitale Dokumente, teilweise sind bereits BIM-Modelle vorhanden (siehe orange-grün gestreifte Symbole in Abbildung A-1).

Die **Ausführung** erfolgt durch das Fachpersonal, überwacht durch die Bauleitung. Falls ein BIM-Modell vorhanden ist, können die Ist-Daten des Bauobjekts mit den Soll-Daten digital aktualisiert werden. In Zukunft soll auch die ereignisorientierte Simulation zur Unterstützung in der Planungs- und Ausführungsphase zum Einsatz kommen (orangene Symbole). Die vorliegende Arbeit bietet dafür ein Vorgehensmodell zur Entwicklung und Integration in den gesamten Bauprozess bis zum **Betrieb** des Bauobjekts.

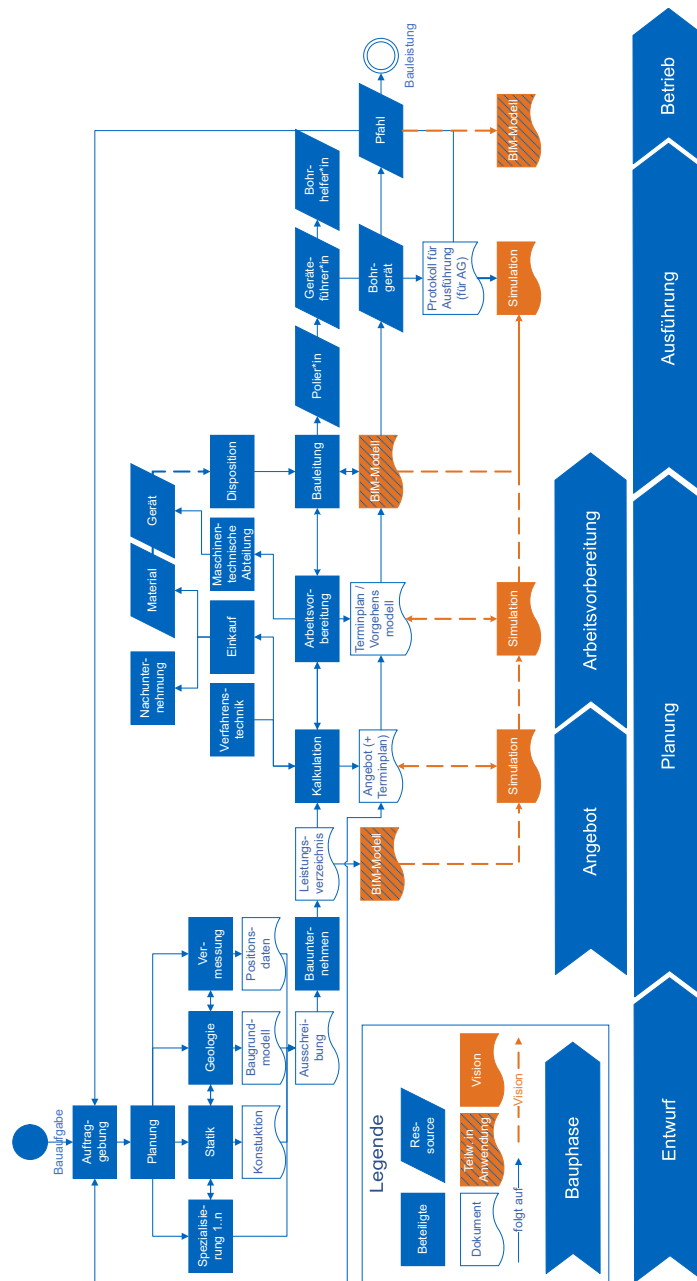


Abbildung A-1: Organigramm der Beteiligten während der Bauphasen am Beispiel der Pfahlproduktion im Spezialtiefbau (eigene Darstellung nach [Bec-2023, S. 28ff])

B Ergänzungen zum Anwendungsbeispiel 2

Tabelle B-1: Änderungen gegenüber den Soll- und Ist-Daten (aufbereitet) für die Materialanlieferung für das Hochbauprojekt 2 (eigene Darstellung nach [fml-2023b])

Material	LHM	TE	Anzahl Soll-Bestellungen	Anzahl Ist-Bestellungen	Anzahl Soll-LHM	Anzahl Ist-LHM	Anzahl Soll-Materialien	Anzahl Ist-Materialien
Bodenplatten	Einwegpalette	12 m ²	187	101 (-46 %)	2736	2424 (-11 %)	28.814	29.088 (1 %)
Dämmung	Europalette	8 m ²	12	17 (42 %)	747	1165 (56 %)	5403	9320 (72 %)
Deckenelemente	Europalette	7 m ²	187	113 (-40 %)	4030	3408 (-15 %)	23.136	23.856 (3 %)
Gipskartonplatten	Palette	65 m ²	748	122 (-84 %)	2521	1516 (40 %)	60.586	138.385 (128 %)
Kabel	Kabeltrommel	500 m	905	14 (-98 %)	1367	45 (-97 %)	395.429	22.500 (-94 %)
Kabeltrassen	Bündel	108 m	12	25 (108 %)	30	138 (360 %)	2477	14.904 (502 %)
Kleinteile Elektro	Europalette	16 Stück	116	65 (-44 %)	116	268 (131 %)	12.605	4288 (-66 %)
Kleinteile Heizung	Gitterbox	188 Stück	258	206 (-20 %)	279	674 (142 %)	21.085	126.712 (501 %)
Lampen	Europalette	16 Stück	142	14 (-90 %)	304	43 (-86 %)	4176	688 (-84 %)
Lüftungskanäle	Gitterbox	16 m	293	369 (26 %)	953	1335 (40 %)	31.217	21.360 (-32 %)
Metalpaneele	Europalette	33 m ²	232	47 (-80 %)	876	544 (-38 %)	24.430	17.952 (-27 %)
Raumlufttechnik	Europalette	16 Stück	535	127 (-76 %)	876	473 (-46 %)	7124	7568 (6 %)
Rohre	Rohrbündel	138 m	262	97 (-63 %)	319	489 (53 %)	32.239	67.482 (109 %)
Sicherungskästen	Europalette	2 Stück	116	44 (-62 %)	116	281 (142 %)	142	562 (296 %)
Sprinkler	16 Stück	Europalette	128	45 (-65 %)	128	182 (42 %)	5025	2912 (-42 %)
Teppich	Europalette	200 m ²	71	12 (-83 %)	193	113 (-41 %)	28.034	22.600 (-19 %)
Türen	Europalette	8 Stück	278	25 (-91 %)	433	147 (-66 %)	1940	1176 (-39 %)
			Σ 4482	Σ 1443 (-68 %)	Σ 15.019	Σ 13.858 (-8 %)	Σ 683.862	Σ 511.353 (-25 %)

C Ergänzungen zum Anwendungsbeispiel 3

C.1 Ergebnisse der Modellierung

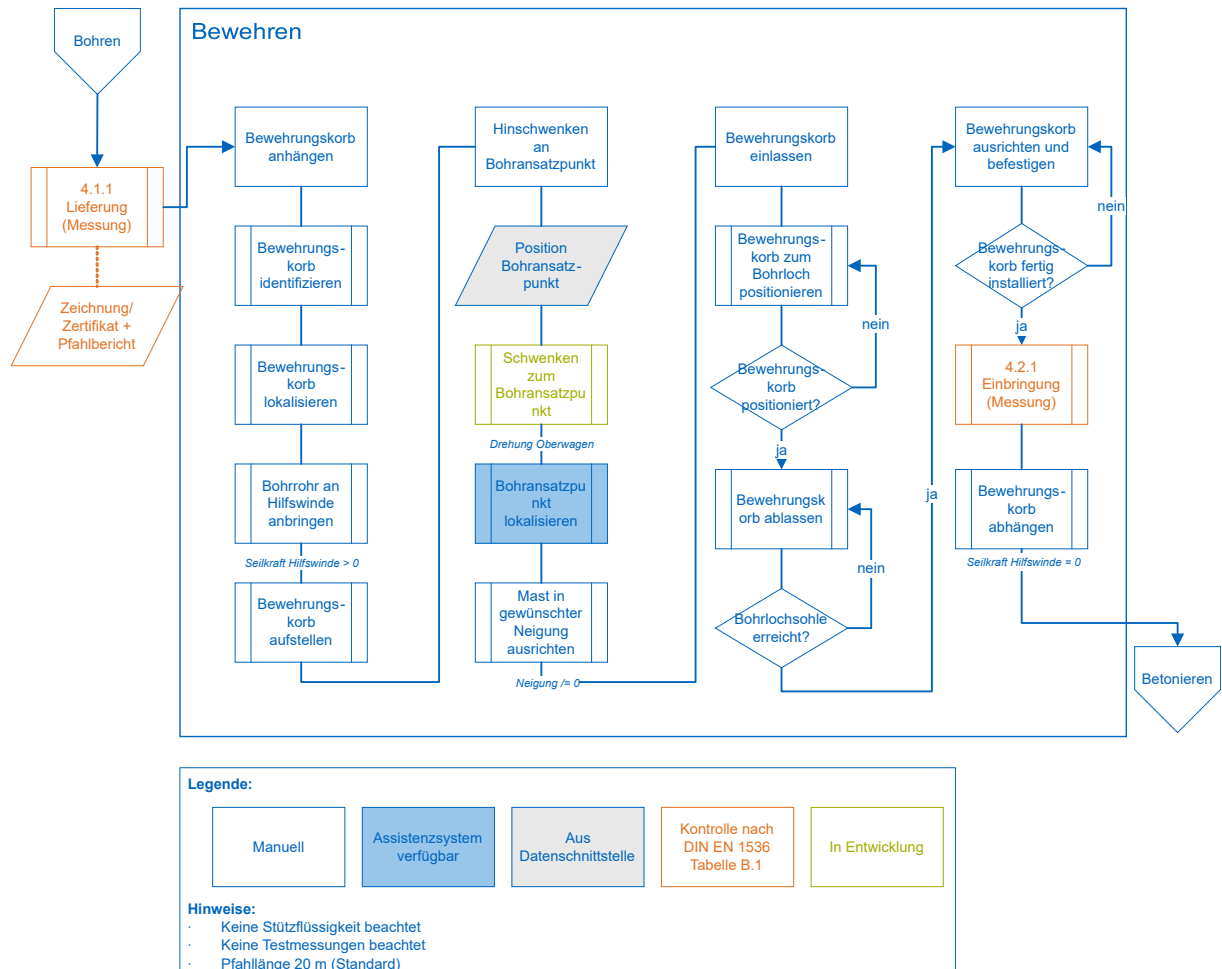
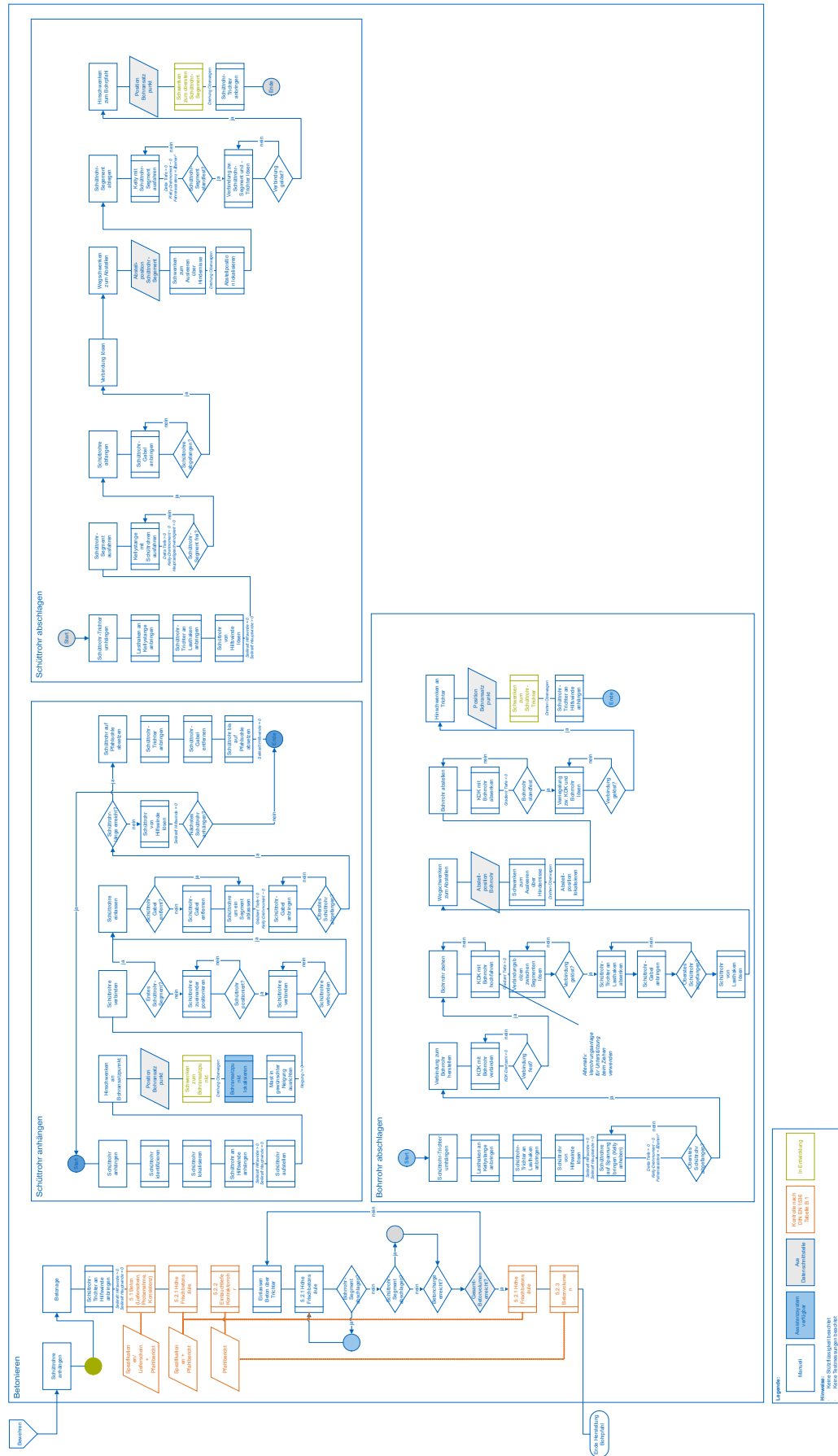


Abbildung C-1: Flussdiagramm für die Beschreibung des Bewehrungsvorgangs beim Kellybohrverfahren

Abbildung C-3: Flussdiagramm für die Beschreibung des Betoniervorgangs beim Kellybohrverfahren



C.2 Ergebnisse der Datensammlung

Tabelle C-1: Anzahl an zur Verfügung stehenden Daten pro Tag (eigene Darstellung nach [fml-2021f])

Nr.	Aktivität	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12A	12B	13A	13B	14A	14B	15A	15B	16	Summe	Anteil	
1	Beton einlassen	-	-	3009	1905	2356	2831	2600	-	4118	4838	-	-	-	-	-	-	-	1	1	-	21.659	5,85 %	
2	Schüttrohre zusammenbauen	-	-	1549	1194	1044	1164	1217	-	1628	1555	1658	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11.009	2,97 %	
3	Schüttrohre abschlagen	-	-	797	-	-	469	476	-	1139	1696	1	4	1	-	-	-	-	-	-	-	4613	1,25 %	
4	Verrohrung abschlagen	-	-	1697	762	896	1206	981	-	1574	1944	460	-	2	-	-	-	-	-	-	-	9542	2,58 %	
5	Verrohrung ziehen	-	-	1791	4200	1295	614	677	-	3699	784	-	-	1	-	-	-	3	1	-	-	13.065	3,53 %	
6	Klebspalter einbauen	-	1885	2488	2987	3068	2088	2279	-	133	1182	2241	-	537	-	482	-	-	-	-	-	19.170	5,26 %	
7	Bewehrung einbauen	-	-	859	805	1032	1015	735	-	1115	1404	1464	-	1272	-	255	-	-	-	-	-	9566	2,69 %	
8	Verrohrung setzen	1256	1776	2093	5162	2484	2629	2545	464	3747	3079	2167	1531	1812	2149	1118	1303	2680	2095	1067	4344	45.401	12,26 %	
9	Verrohrung eindrehen	1149	3718	3507	2958	2742	3229	2617	796	5468	2731	76	1933	873	2417	538	1435	1333	2373	31	2412	42.338	11,44 %	
10	Ablassen	267	892	956	655	802	848	797	200	1388	1128	848	506	989	698	715	268	974	1286	3319	1269	18.005	5,08 %	
11	Lösen mit Bohrer	675	61	-	-	-	25	-	-	-	-	-	-	-	-	38	-	-	-	-	46	845	0,23 %	
12	Ziehen	552	2051	2329	1461	2028	2057	2027	603	2828	2465	1227	1367	1431	1470	1197	871	1901	1987	526	2739	33.217	8,97 %	
13	Lösen	-	1275	1371	1174	1337	1259	1274	305	1823	1226	710	879	661	1204	505	593	908	1185	341	1522	19.552	5,28 %	
14	Lesen	743	1749	2160	1695	1763	2121	2091	471	2274	1655	683	1271	824	1731	672	755	1169	1713	266	2155	27.691	7,55 %	
15	Verrohrung eindrehen	-	-	-	-	-	-	-	-	2073	2379	3324	-	4209	-	2924	-	2805	165	1519	2898	22.277	0,6 %	
16	Verrohrung ziehen	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1976	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1976	0 %	
17	Sonstiges	446	1610	669	463	403	992	398	18	991	391	856	-	-	52	16	410	255	31	1	54	8016	2,17 %	
18	Wasser nachfüllen	-	850	892	832	1006	976	996	460	1166	1753	710	1115	582	1434	562	1189	955	1210	105	1536	18.329	4,95 %	
19	Werkzeug wechseln	-	-	367	387	50	-	175	-	674	284	181	-	231	-	299	-	153	-	197	196	3194	0,86 %	
20	Tanken	-	-	503	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	171	674	0,18 %	
21	Tiefe messen	-	-	240	205	211	221	336	-	710	789	97	-	168	-	43	-	100	-	-	28	3148	0,85 %	
22	Positionieren	-	-	-	-	1044	432	-	-	-	541	737	-	-	208	-	-	-	-	-	-	2962	0,8 %	
23	Warten	-	-	-	-	-	-	277	-	302	-	-	-	-	-	-	-	41	2948	1	-	3969	0,96 %	
24	Pause	-	-	5337	4293	4583	4603	7024	-	424	-	255	-	4321	-	3864	-	1220	-	3701	3224	46.629	12,8 %	
25	Auf Beton warten	-	-	-	-	-	533	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	539	0,15 %	
26	Wartung	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
27	Ausfall	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5683	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5683	1,54 %	
Summe		6098	16.370	32.111	32.082	27.100	29.342	29.488	3317	30.081	35.128	14.491	8606	13.705	11.363	10.304	6824	11.669	14.832	9557	19.996	370.174		
Anteil an Daten		1,37 %	4,42 %	8,67 %	8,67 %	7,32 %	7,89 %	7,97 %	0,9 %	10,56 %	9,49 %	3,91 %	2,32 %	3,70 %	3,07 %	2,78 %	1,84 %	3,16 %	4,01 %	2,59 %	5,32 %			

C.3 Ergebnisse der Datenaufbereitung

C.3.1 Hyperparameter der implementierten Modelle

Tabelle C-2: Übersicht über die Hyperparameterabstimmung für die ML-Modelle (hervorgehoben: Referenzkonfiguration bei Mehrauswahl; eigene Darstellung nach [fml-2020i; fml-2020m; Fis-2021b])

	Hyperparameter	Ausgewählter Wertebereich
Decision Tree	Kriterium	Gini-Index, Entropie-Maß
	Max. Baumtiefe	keine, 10 , 30, 50, 60, 100
	Min. Knotenaufspaltung (Zwischenschicht)	1, 10 , 50, 100, 200, 300, 400
	Min. Kontenaufspaltung (Ausgangsschicht)	1 , 10, 100, 200, 300, 400, 500, 600
	Min. Informationsgewinn	0 , 0,1, 0,2, 0,5
Logistische Regression	Regularisierungsparameter	0,001, 0,01, 0,1, 1, 10, 100 , 1000
	Regularisierung	L1, L2
	Löser	Newton-cg , Lbfgs, Liblinear, Sag
	Klassifikationsproblem	Ovr (binär), Multinomial
Naive Bayes	Wahrscheinlichkeitsverteilung	Gauß-Verteilung
	Klassifizierungsregel	Maximum A Posteriori
Support Vector Machine	Regularisierungsparameter	0,001, 0,01, 0,1, 1, 10 , 100, 1000
	Kernel-Funktion	RBF , Sigmoid
	Kernel-Koeffizient	0,001, 0,01, 0,1, 1
Künstliche Neuronale Netze	Anzahl der Schichten	5 Input Layer – 6 Hidden Layer – 5 Output Layer
	Anzahl der Knoten pro Schicht	128
	Aktivierungsfunktion	ReLU
	Gesamtzahl der Trainingsmuster	6, 8 , 12
	Epochen	10, 15 , 20
	Verlustfunktion	Categorical Cross-Entropy
	Optimierer	Simple Adam

Tabelle C-3: Übersicht über die Hyperparameterabstimmung für die DL-Modelle (hervorgehoben: Referenzkonfiguration bei Mehrauswahl; eigene Darstellung nach [Fis-2021c])

Hyperparameter	Ausgewählter Wertebereich
Anzahl der Knoten pro Schicht	128
Gesamtzahl der Trainingsmuster	256
Epochen	50 , 100
Verlustfunktion	Categorical Cross-Entropy
Optimierer	Adam
Lernrate	0,001
Abbruchrate	0,3
Fenstergröße	8, 16 , 32, 48, 60 (überlappend) (keine bei ANN)

C.3.2 Hierarchische Klassifizierungsstudie mit ANN- und DeepConvLSTM-Modellen

Erste Detailebene (LoD1)

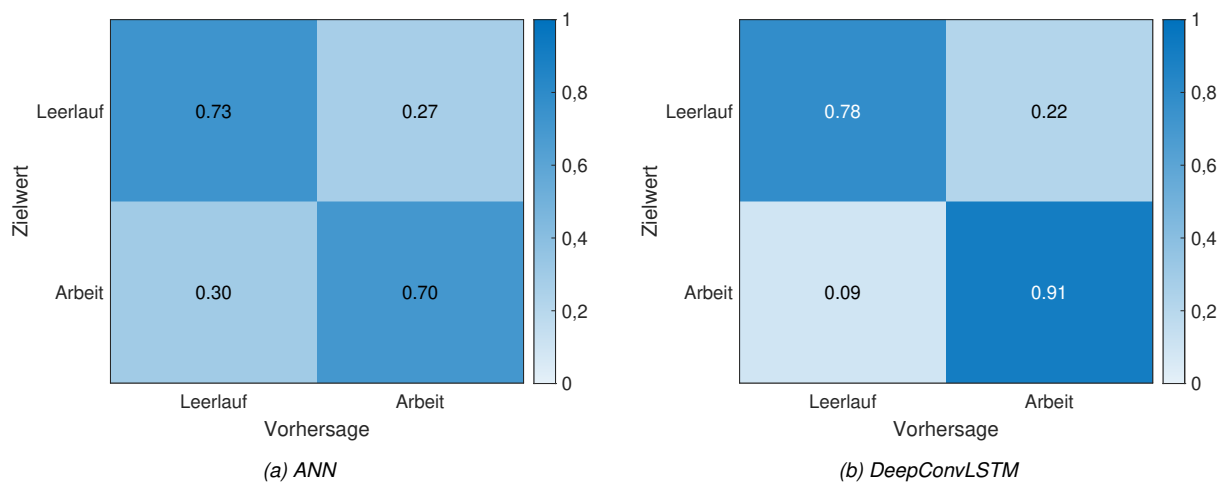


Abbildung C-4: LoD1-Konfusionsmatrizen für ANN und DeepConvLSTM (eigene Darstellungen nach [fml-2021f; Fis-2023a])

Zweite Detailebene (LoD2)

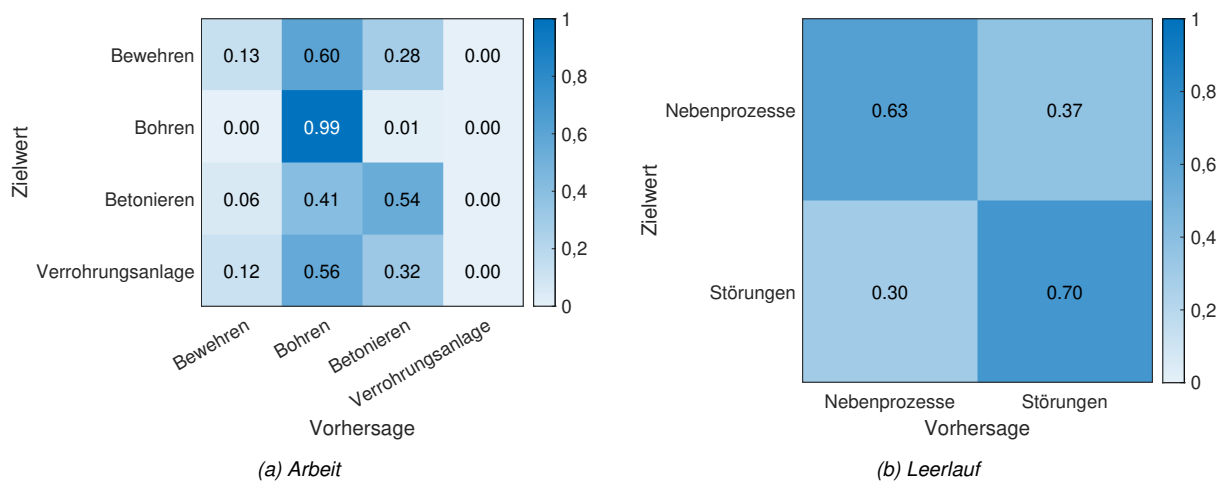


Abbildung C-5: LoD2-Konfusionsmatrizen für ANN (eigene Darstellungen nach [fml-2021f; Fis-2023a])

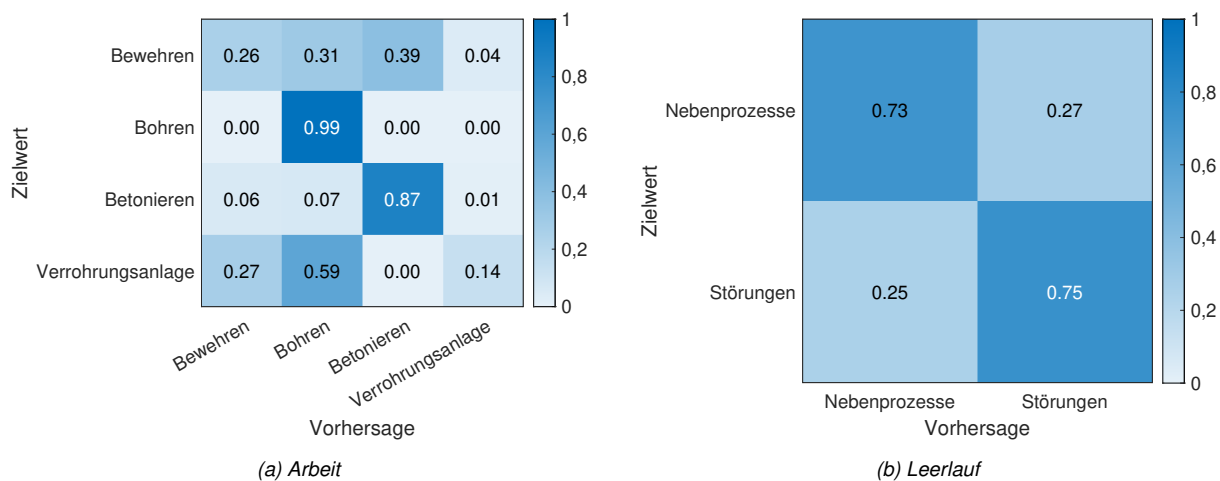


Abbildung C-6: LoD2-Konfusionsmatrizen für DeepConvLSTM (eigene Darstellungen nach [fml-2021f; Fis-2023a])

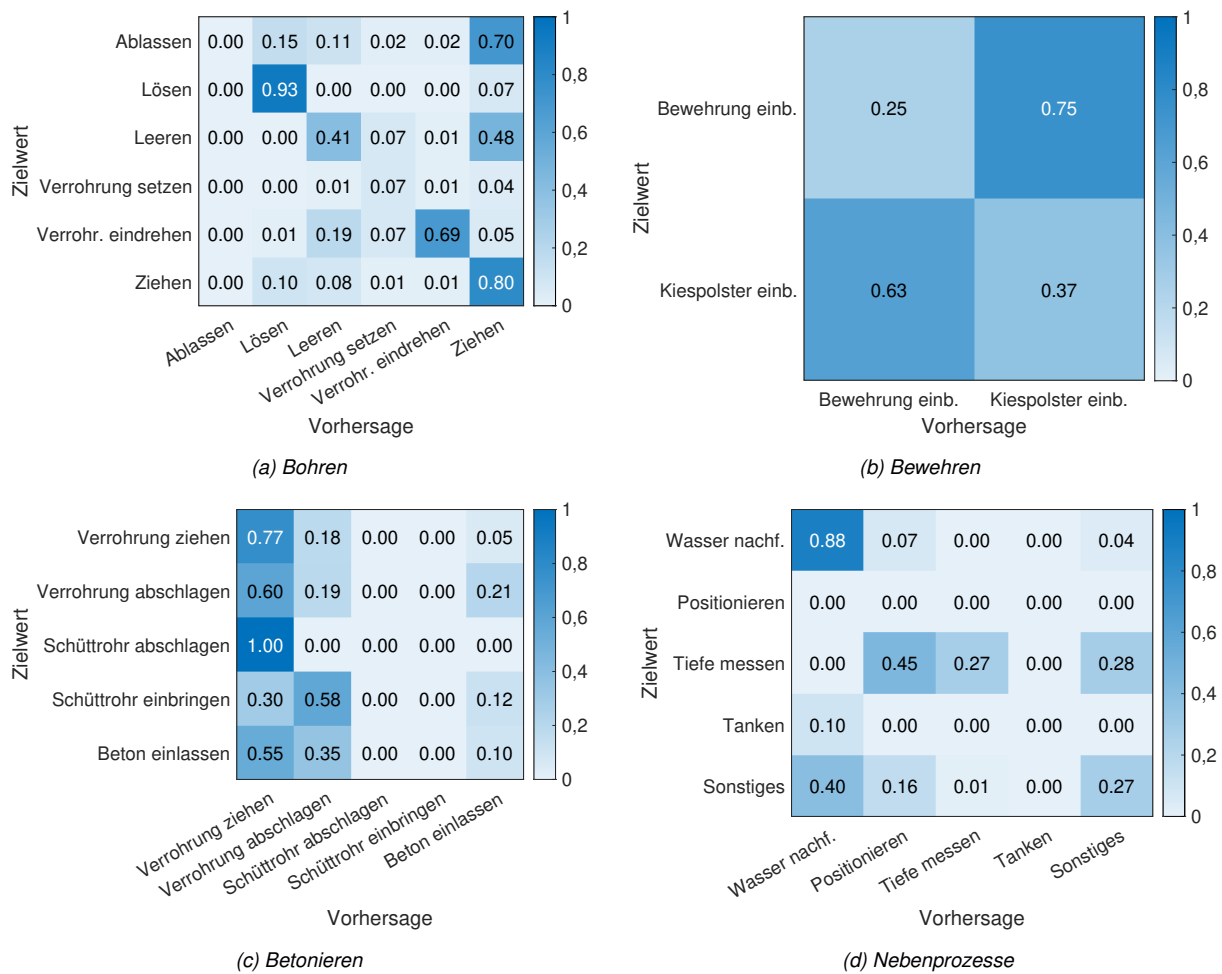
Dritte Detailebene (LoD3)

Abbildung C-7: LoD3-Konfusionsmatrizen für ANN (eigene Darstellungen nach [fml-2021f; Fis-2023a])

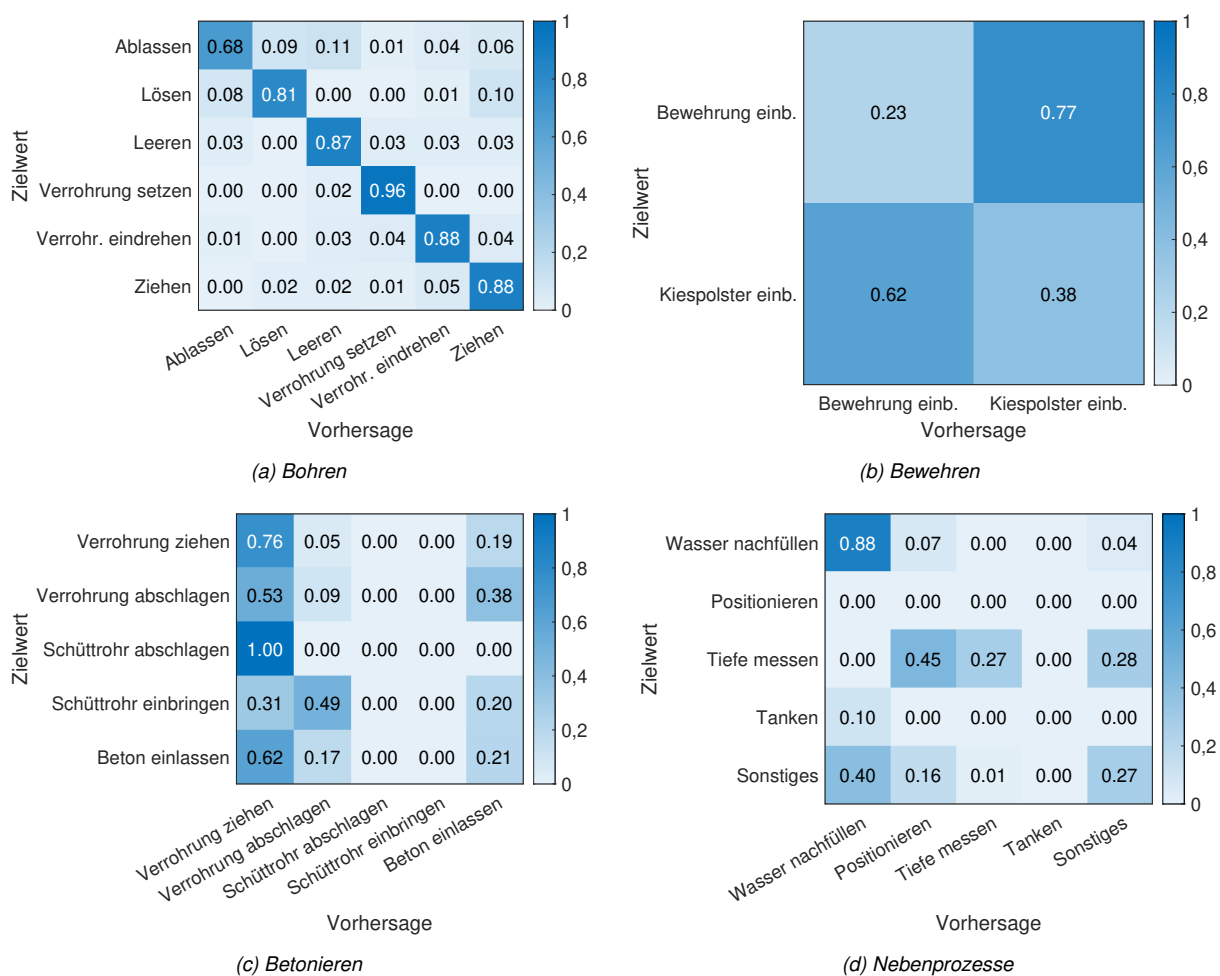


Abbildung C-8: LoD3-Konfusionsmatrizen für das DeepConvLSTM (eigene Darstellungen nach [fml-2021f; Fis-2023a])

C.4 Ergebnisse des Experiments

Tabelle C-4: Parameter der linearen Regression für die einzelnen Teilprozesse (eigene Darstellung nach [Fis-2023a])

Teilprozess	Parameter	25 %	50 %	75 %
Bohren	Erwartungswert	$-5,33 \cdot 10^{-12}$	$7,21 \cdot 10^{-12}$	$-2,17 \cdot 10^{-12}$
	Standardabweichung	7995,83	7787,97	7090,17
	Steigung	1211,12	1216,17	1173,93
	Schnittpunkt	-16.781,52	-17.638,90	-17.837,04
Leerlauf 1	Erwartungswert	$2,82 \cdot 10^{-13}$	$-7,37 \cdot 10^{-13}$	$-5,02 \cdot 10^{-13}$
	Standardabweichung	3619,61	4555,91	5119,83
	Steigung	-163,18	-26,71	-32,85
	Schnittpunkt	12.496,47	7209,08	7381,52
Bewehren	Erwartungswert	$7,84 \cdot 10^{-15}$	$-3,18 \cdot 10^{-13}$	$-6,27 \cdot 10^{-13}$
	Standardabweichung	500,08	581,13	545,05
	Steigung	105,71	83,95	75,64
	Schnittpunkt	-2299,57	-1480,55	1184,78
Leerlauf 2	Erwartungswert	$1,39 \cdot 10^{-13}$	$3,4 \cdot 10^{-13}$	$1,36 \cdot 10^{-13}$
	Standardabweichung	762,92	1869,31	1636,55
	Steigung	-45,05	-41,68	-20,96
	Schnittpunkt	2596,29	2519,07	1639,18
Schüttrohr	Erwartungswert	$-2,59 \cdot 10^{-13}$	$-3,72 \cdot 10^{-13}$	$-3,55 \cdot 10^{-13}$
	Standardabweichung	785,01	691,22	650,05
	Steigung	72,25	58,94	56,68
	Schnittpunkt	-1039,17	-494,96	-301,61
Leerlauf 3	Erwartungswert	$6,27 \cdot 10^{-14}$	$-1,09 \cdot 10^{-12}$	$-3,35 \cdot 10^{-13}$
	Standardabweichung	2238,13	2218,63	27.756,29
	Steigung	-30,32	89,56	129,42
	Schnittpunkt	3359,87	-266,50	-1134,46
Betonieren	Erwartungswert	0	$-1,11 \cdot 10^{-12}$	$-2,7 \cdot 10^{-12}$
	Standardabweichung	1407,71	1534,68	1448,72
	Steigung	267,39	415,97	436,95
	Schnittpunkt	1505,92	-3429,70	-4101,32