

Ein Beitrag zur digitalen Transformation der Lean Construction am Beispiel der BIM-basierten Taktplanung und Taktsteuerung

Dissertation

Zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation von Dipl.-Ing. Christian Leifgen aus Hadamar
Tag der Einreichung: 13.08.2019, Tag der Prüfung: 24.10.2019
Darmstadt — D 17

1. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Uwe Rüppel
2. Gutachten: Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christian Hofstadler



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT**

Fachbereich Bau- und Umweltingenieur-
wissenschaften
Institut für Numerische Methoden und
Informatik im Bauwesen

Ein Beitrag zur digitalen Transformation der Lean Construction am Beispiel der BIM-basierten Taktplanung und Taktsteuerung
Dissertation

Genehmigte Dissertation von Dipl.-Ing. Christian Leifgen aus Hadamar

1. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Uwe Rüppel
2. Gutachten: Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christian Hofstadler

Tag der Einreichung: 13.08.2019

Tag der Prüfung: 24.10.2019

Darmstadt – D 17

Dieses Werk ist lizenziert unter einer
Creative Commons Namensnennung - Nicht-kommerziell - Weitergabe unter gleichen Bedingungen
4.0 International Lizenz. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



Ein Beitrag zur digitalen Transformation der Lean Construction am Beispiel der BIM-basierten Taktplanung und Taktsteuerung
Dissertation

Genehmigte Dissertation von Dipl.-Ing. Christian Leifgen aus Hadamar

1. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Uwe Rüppel
2. Gutachten: Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christian Hofstadler

Tag der Einreichung: 13.08.2019

Tag der Prüfung: 24.10.2019

Darmstadt – D 17



Katharina Franziska



Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen der Technischen Universität Darmstadt.

Meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Uwe Rüppel, danke ich für die Möglichkeit zur Promotion und die Übernahme des Erstreferats. Seine Aufgeschlossenheit gegenüber meinen Forschungsinteressen sowie seine stetige fachliche und moralische Unterstützung legten das Fundament für diese Arbeit. Auch danke ich Herrn Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christian Hofstadler für das Interesse an meiner Dissertation und die Übernahme des Korreferates.

Für die Unterstützung, den intensiven, kritischen sowie konstruktiven Austausch während der Anfertigung dieser Arbeit und die vielen netten Gespräche darüber hinaus danke ich ganz besonders Herrn Marcus Dombois.

Frau Laura Kristina Möller und Herrn Steffen Franz danke ich herzlich für die vielen schönen gemeinsamen Stunden und Erlebnisse am Institut und im Privaten.

Herrn Dr.-Ing. Uwe Zwinger möchte ich dafür danken, dass er es mir ermöglichte, meine fachlichen Interessen an der Bauinformatik und dem Baubetrieb in meine Studien- sowie Diplomarbeit einfließen zu lassen und so den Anstoß zu meiner Promotion gab.

Überdies danke ich meinen Kolleginnen und Kollegen Barbara Kohane, Timo Bittner, Christian Eller, Meiling Shi, Christian Thiele, Patrick Scheich, Tim Huyeng, André Hoffmann, Luisa Kuhn, Anna Wagner, Michael Kreger, Dr.-Ing. Robert Irmler, Dr.-Ing. Christian Schwöbel, Dr.-Ing. Philipa Petkova und Susanne Rohmig für die gute Zusammenarbeit und überaus angenehme Arbeitsatmosphäre. Weiterhin danke ich Caroline Warmuth, Steffen Kujajewski und insbesondere Christopher Grund für die fachlich interessanten Diskussionen und gute Zusammenarbeit während der Betreuung ihrer Abschlussarbeiten.

Zutiefst dankbar bin ich Katharina, die immer für mich da war und ist. Ohne ihre stetige Motivation und Unterstützung sowie ihr Verständnis hätte ich diese Arbeit nicht anfertigen können. Auch danke ich ihr für die zahlreichen, langen und bereichernden fachlichen Diskussionen.

Meiner Familie danke ich für alles.

Christian Leifgen



Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	IX
Abkürzungen	XI
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung	4
1.3 Aufbau der Arbeit	6
1.4 Methodik	8
2 Grundlegende Begriffe, Konzepte und historische Entwicklungen	11
2.1 Begriffe und Definitionen	11
2.1.1 Wertschöpfungskette Bau und Produktivität	14
2.1.2 Abgrenzung von Digitalisierung, digitaler Revolution und digitaler Transformation	15
2.1.3 Wissen, Informationen, Zeichen, Daten	17
2.2 Visuelle Programmierung	18
2.3 Building Information Modeling	20
2.3.1 Differenzierung zwischen Modell und Methodik	21
2.3.2 Digitale Bauwerksmodelle	23
2.4 Lean Construction	25
2.4.1 Entstehungsgeschichte der Lean Construction	25
2.4.2 Lean Construction als ganzheitlicher Ansatz	30
2.4.3 Prinzipien	31
2.5 Taktplanung und Taktsteuerung	34
2.5.1 Taktplanung	34
2.5.2 Taktsteuerung	35
2.5.3 Taktsteuerungstafeln	37

3 Taktplanung und Taktsteuerung im Kontext der digitalen Transformation im Bauwesen	39
3.1 Herausforderungen und Chancen in der Baubranche	39
3.2 Stand der Wissenschaft und Praxis	44
3.2.1 Wissenschaftliche Einordnung	44
3.2.2 Digitalisierungsansätze von Methoden und Werkzeugen der Lean Construction in der Baupraxis	48
3.2.3 Softwarelösungen	51
3.2.4 Derzeitige Arbeitsweisen in Taktplanung und Taktsteuerung	54
3.3 Forschungsbedarf und Möglichkeiten zur digitalen Transformation der Taktplanung und Taktsteuerung	56
3.3.1 Forschungsbedarf	57
3.3.2 Ansätze zur digitalen Transformation der Taktplanung und Taktsteuerung	58
3.3.3 Anwendergruppen und Anwendungsfälle einer digital unterstützten Taktsteuerung	62
3.3.4 Anforderungen an eine digital unterstützte Taktsteuerung	66
3.3.5 Funktionalitäten und Systemeigenschaften	67
3.3.6 Abgrenzung zu bestehenden Ansätzen und Softwarelösungen	68
4 Gemeinsame Anwendung von BIM-Methodik und Lean Construction	71
4.1 Digitale Transformation, BIM-Methodik und Lean Construction in der Wertschöpfungskette Bau	71
4.2 Daten, Informationen und Wissen als Basis einer digitalen, BIM-basierten Lean Construction	76
4.3 Automatisierung und digitale Arbeitsweisen	80
5 Konzept einer ganzheitlichen digitalen erweiterten Taktplanung und Taktsteuerung	83
5.1 Einordnung in den Projektkontext	84
5.2 Annahmen und Festlegungen im Rahmen dieser Arbeit	87
5.3 Datenbank GADGET.DB und LC-Modell als Informationsbasis	88
5.3.1 Datenbank GADGET.DB	88
5.3.2 LC-Modell	89
5.4 Ganzheitliche digitale erweiterte Taktplanung GADGET.P	93
5.5 Ganzheitliche digitale erweiterte Taktsteuerungstafel GADGET.S	98
5.5.1 Softwarearchitektur	98
5.5.2 Bausteine	101
5.5.3 Räumliche Einordnung und Vernetzung	104

5.5.4	Mehrschichtige Informationsdarstellung	106
5.5.5	Layouts & Templates	107
5.5.6	Snapshots, Teilen und Übertragen von Informationen	108
5.5.7	Mehrsprachige Nutzung	109
5.5.8	Zugriffsmanagement und Identifikation	110
5.5.9	Automatisierung	111
5.5.10	Hardware	111
5.5.11	Bausteine und darzustellende Inhalte	112
5.6	Anwendung der ganzheitlichen digitalen erweiterten Taktsteuerungstafel in Projekten	130
5.6.1	Zusammenstellung von Layouts und Templates	131
5.6.2	Einrichtung zu Beginn der Ausführungsphase und Aktualisierungen	132
5.6.3	Nutzung in den Anwendungsfällen während der Ausführungsphase	133
5.6.4	Einbindung in BIM-Strukturen	135
6	Implementierungen zur Verifizierung der technischen Umsetzbarkeit	139
6.1	Implementierung der Demonstrationsanwendung GADGET.P	139
6.1.1	Funktionalitäten der gewählten Softwareumgebung	141
6.1.2	Demonstration des Einsatzes visueller Programmierung im Kontext der Taktplanung	142
6.2	Implementierung der Demonstrationsanwendung GADGET.S	147
6.2.1	Programmierung und Technologien	148
6.2.2	Implementierung und Verifizierung der technischen Umsetzbarkeit von GADGET.S1	149
6.2.3	Implementierung und Verifizierung der technischen Umsetzbarkeit von GADGET.S2	157
7	Anwendungsbeispiel der Demonstrationsanwendungen GADGET zur Validierung	161
7.1	Digitale Taktplanung mit GADGET.P	161
7.2	Erstellen und Verwalten von digitalen Taktsteuerungstafeln mit GADGET.S1	166
7.3	Digitale Taktsteuerung mit GADGET.S2	176
8	Zusammenfassung und Ausblick	183
8.1	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse	183
8.1.1	Mehrwert der digitalen Transformation von Taktplanung und Taktsteuerung	184
8.1.2	Einordnung	185

8.2 Ausblick	186
8.2.1 Technische Weiterentwicklung von GADGET	187
8.2.2 Herausforderungen einer ganzheitlichen Umsetzung in der Praxis	189
A Anhang	191
A.1 Weitere Bausteine	191
Literaturverzeichnis	193

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1	Aufbau dieser Dissertation – Teil 1	6
Abbildung 1-2	Aufbau dieser Dissertation – Teil 2	7
Abbildung 1-3	Aufbau dieser Dissertation – Teil 3	8
Abbildung 2-1	Übersicht der Mindestanforderungen an Bestandteile eines Common Data Environment	13
Abbildung 2-2	Wissenspyramide	18
Abbildung 2-3	Schematische Darstellung visuellen Programmcodes	20
Abbildung 2-4	Schematische Darstellung der Ampelsystematik	38
Abbildung 2-5	Darstellung einer realen Taktsteuerungstafel	38
Abbildung 3-1	Beispiel einer Online-Plantafel	50
Abbildung 3-2	Screenshot der Anwendung VisiLean	52
Abbildung 3-3	Einordnung des Taktungsansatzes in Projektphasen	55
Abbildung 3-4	Informationszuwachs in Taktbesprechungen	59
Abbildung 4-1	Digitale Transformation der Wertschöpfungskette im Bauwesen	72
Abbildung 4-2	Einordnung von digitaler Transformation, BIM-Methodik und LC in Unternehmen	74
Abbildung 4-3	Überschneidungen von LC und BIM-Methodik	75
Abbildung 4-4	Informations- resp. Wissensbereiche als Basis für die Anwendung von LC und BIM-Methodik	77
Abbildung 5-1	Übersicht der Konzeptbestandteile von GADGET	83
Abbildung 5-2	Einordnung von GADGET.P und GADGET.S sowie LC-Modell in die Projektphasen	85
Abbildung 5-3	Übersicht der in GADGET.DB gespeicherten Objekte	89
Abbildung 5-4	Beispielhafte Darstellung eines LC-Modells	90
Abbildung 5-5	Bestandteile und Anwendungsfälle des LC-Modells	91
Abbildung 5-6	Beispielprozess zur Anwendung des LC-Modells	92
Abbildung 5-7	Beispielprozess zur Erstellung und Aktualisierung des LC-Modells	93
Abbildung 5-8	GADGET.P – Übersicht und Ansätze zur digitalen Transformation	95
Abbildung 5-9	GADGET.S – Übersicht des Softwarekonzepts	99
Abbildung 5-10	UML-Klassendiagramm der Struktur, Attribute und Funktionen von GADGET.S	100

Abbildung 5-11	Schematische Darstellung der Benutzeroberfläche von GADGET.S	101
Abbildung 5-12	UML-Klassendiagramm der Struktur, Attribute und Funktionen von Bausteinen	103
Abbildung 5-13	Schematische Darstellung eines Bausteins	104
Abbildung 5-14	Räumliche Einordnung von GADGET.S auf Baustellen	105
Abbildung 5-15	Baustein: Bauwerksvisualisierung	113
Abbildung 5-16	Baustein: Bauablauf	114
Abbildung 5-17	Baustein: Interaktiver Taktplan	117
Abbildung 5-18	Baustein: Wertschöpfung	118
Abbildung 5-19	Baustein: Terminplanung	118
Abbildung 5-20	Baustein: Kennzahlen	120
Abbildung 5-21	Baustein: Qualität & Termintreue	121
Abbildung 5-22	Baustein: Ordnung, Sauberkeit, Arbeitssicherheit	122
Abbildung 5-23	Baustein: Datenaufnahme	126
Abbildung 5-24	Schematische Anordnung von Bausteinen eines GADGET.S Layouts - Beispiel 1	128
Abbildung 5-25	Schematische Anordnung von Bausteinen eines GADGET.S Layouts - Beispiel 2	129
Abbildung 5-26	Zyklus der Anwendung von GADGET.S	131
Abbildung 5-27	Zusammenstellung von Layouts und Templates mit GADGET.S	132
Abbildung 5-28	Projektsteuerungsraum mit vier Layouts der GADGET.S für den Anwendungsfall der täglichen Taktbesprechung	133
Abbildung 6-1	Übersicht der Softwarestruktur	140
Abbildung 6-2	Ablaufdiagramm der Demonstrationsanwendung GADGET.P	143
Abbildung 6-3	Dynamo Quellcode zur Einteilung des Grundrisses in ein Raster	145
Abbildung 6-4	Dynamo Quellcode zur Zuordnung von Räumen zu Taktbereichen	146
Abbildung 6-5	Dynamo Quellcode zur Berechnung der benötigten Kolonnenstärke	147
Abbildung 6-6	Teilanwendungen GADGET.S1 und GADGET.S2	148
Abbildung 6-7	Programmstruktur des Front-Ends von GADGET.S1	151
Abbildung 6-8	Programmstruktur des Back-Ends von GADGET.S1	152
Abbildung 6-9	Grafische Benutzeroberfläche zum Erstellen von Layouts	153
Abbildung 6-10	Durchsuchbare Eingabefelder für Sprachen, Rollen und Datenquellen	154
Abbildung 6-11	Grafische Benutzeroberfläche zur Platzierung und Anpassung von Bausteinen	156
Abbildung 7-1	In Revit geladenes Gebäudemodell	162
Abbildung 7-2	Dynamo Quellcode der Eingangswerte	163

Abbildung 7-3	Ablauf der Erstellung eines Rasters zur Einteilung des Grundrisses in Taktbereiche	164
Abbildung 7-4	Exakte Ergebnisse der Berechnung der benötigten Kolonnenstärken . .	165
Abbildung 7-5	GADGET.S1 – Erstellen von Layouts – Schritt 1	169
Abbildung 7-6	GADGET.S1 – Erstellen von Layouts – Schritt 2	170
Abbildung 7-7	GADGET.S1 – Erstellen von Layouts – Schritt 3	171
Abbildung 7-8	GADGET.S1 – Erstellen von Layouts – Auswählen, Konfigurieren und Platzieren von Bausteinen	172
Abbildung 7-9	GADGET.S1 – Vollständige Konfiguration des Layouts für Taktbesprechungen	173
Abbildung 7-10	GADGET.S1 – Vollständige Konfiguration des Layouts zur Information der Anlieger und Öffentlichkeit	174
Abbildung 7-11	GADGET.S1 – Liste gespeicherter Layouts	175
Abbildung 7-12	GADGET.S1 – Detailansicht eines gespeicherten Layouts	176
Abbildung 7-13	GADGET.S2 – Beispielhafte Anwendung des mittels GADGET.S1 erstellten Layouts zur Taktbesprechung	180
Abbildung 7-14	GADGET.S2 – Beispielhafte Anwendung des mittels GADGET.S1 erstellten Layouts zur Taktbesprechung – Details	181



Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1	Gegenüberstellung von Fertigungscharakteristika stationärer Produktion mit Baustellenproduktion	29
Tabelle 3-1	Übersicht über Anwendergruppen und Anwendungsfälle von GADGET.S .	63
Tabelle 3-2	Vergleich der Anwendungsfälle von GADGET mit bestehenden Softwarelösungen	69
Tabelle 3-3	Vergleich der Funktionalitäten von GADGET mit bestehenden Softwarelösungen	70
Tabelle 4-1	Beispiel für Daten, Informationen und Wissen	80
Tabelle 5-1	Baustein: Bauwerksvisualisierung	113
Tabelle 5-2	Baustein: Bauablauf	114
Tabelle 5-3	Baustein: Interaktiver Taktplan	115
Tabelle 5-4	Baustein: Wertschöpfung	116
Tabelle 5-5	Baustein: Terminplanung	116
Tabelle 5-6	Baustein: Kennzahlen	119
Tabelle 5-7	Baustein: Qualität & Termintreue	121
Tabelle 5-8	Baustein: Ordnung, Sauberkeit, Arbeitssicherheit (OSA)	122
Tabelle 5-9	Baustein: Gegenmaßnahmen	123
Tabelle 5-10	Baustein: Logistikelemente und Lagerflächen	123
Tabelle 5-11	Baustein: Transporte	124
Tabelle 5-12	Baustein: Projekt- und Baustelleninformationen	124
Tabelle 5-13	Baustein: Arbeitssicherheit	125
Tabelle 5-14	Baustein: Datenaufnahme	125
Tabelle 5-15	Baustein: Benutzermanagement	127
Tabelle 5-16	Baustein: Stimmungsbarometer	127
Tabelle 5-17	Baustein: Wissensmanagement	127
Tabelle 5-18	Zuordnung von Bausteinen zu Anwendungsfällen	134
Tabelle 5-19	Zuordnung von Bausteinen zu Anwendungsfällen (Fortsetzung)	135
Tabelle 5-20	Einordnung von GADGET.S in eine BAP-Struktur	136
Tabelle 5-21	Einordnung von GADGET.S in eine BAP-Struktur (Fortsetzung)	137
Tabelle A-1	Baustein: Kollisionsprüfungen	191
Tabelle A-2	Baustein: Animation Bauwerksherstellung	191

Tabelle A-3	Baustein: Kanban Board	192
Tabelle A-4	Baustein: Live-Übertragung	192
Tabelle A-5	Baustein: Wetter	192

Abkürzungen

AG	Auftraggeber.
AIA	Auftraggeber Informationsanforderungen.
AN	Auftragnehmer.
API	Programmierschnittstelle (engl. <i>application programming interface</i> , kurz API).
BAP	BIM-Abwicklungsplan.
BIM	Building Information Modeling.
bSDD	buildingSMART Data Dictionary.
bspw.	beispielsweise.
bzgl.	bezüglich.
bzw.	beziehungsweise.
CAD	Computer Aided Design.
CAE	Computer Aided Engineering.
CDE	Common Data Environment.
d. h.	das heißt.
GADGET	ganzheitliche digitale erweiterte Taktung.
GADGET.DB	Datenbank, die GADGET zugrundeliegt.
GADGET.P	ganzheitliche digitale erweiterte Taktplanung.
GADGET.S	ganzheitliche digitale erweiterte Taktsteuerungstafel.
ggf.	gegebenenfalls.
GU	Generalunternehmer.
HOAI	Honorarordnung für Architekten und Ingenieure.

i. A.	im Allgemeinen.
i. d. R.	in der Regel.
IFC	Industry Foundation Classes.
insb.	insbesondere.
IoT	Internet of Things.
LC	Lean Construction.
LC-Modell	digitales Lean Construction Baustellen- und Bauwerksmodell.
LoI	Level of Information.
NU	Nachunternehmer.
o. J.	ohne Jahr.
OSA	Ordnung, Sauberkeit, Arbeitssicherheit.
PPC	Percent Plan Complete.
resp.	respektive.
s.	siehe.
S.	Seite(n).
sog.	sogenannte.
u.	und.
u. v. m.	und viele(s) mehr.
u. a.	unter anderem.
UML	Unified Modeling Language.
vgl.	vergleiche.
z. B.	zum Beispiel.



*Es wird keinen Fortschritt geben,
wenn wir mit den bestehenden
Situationen zufrieden sind.*

Taiichi Ōno
[Ōno u. a., 2013, S. 150]

1 Einleitung

1.1 Motivation und Problemstellung

In den letzten Jahrhunderten fand ein Entwicklungsprozess der gesamten Industrie – von „Industrie 1.0“ bis „Industrie 4.0“ – statt, der sich auch auf die Arbeitsweisen, Technologien und Verfahren im Bauwesen erstreckte und für die als industrielle Revolutionen bezeichneten Umbrüche maßgebend waren. Einschneidende Ereignisse waren die erste industrielle Revolution, bei der mit der Erfindung der Dampfmaschine Ende des 18. Jahrhunderts der Grundstein für alle folgenden Entwicklungen gelegt wurde, die Nutzbarmachung und weite Verbreitung von Elektrizität Ende des 19. Jahrhunderts, die Einführung der Fließbandproduktion Anfang des 20. Jahrhunderts sowie die Entwicklung der Mikroelektronik und die darauf aufbauende Computertechnologie in den 1970er Jahren, die die Unterstützung und Automatisierung vieler Arbeitsabläufe ermöglichte. Seit Beginn des 21. Jahrhunderts ist ein Wandel hin zu einer starken digitalen Vernetzung und Abbildung bisher analoger Prozesse im Gang, der auch als digitale Revolution bezeichnet wird und sich über die Industrie hinaus über die gesamte Gesellschaft erstreckt.

Eng mit diesem Entwicklungsprozess verbunden war und ist eine Steigerung der Produktivität. Verglichen mit anderen Wirtschaftsbereichen liegt der Produktivitätszuwachs in der Bauwirtschaft jedoch trotz technologischen Fortschritts, guter Konjunkturphasen, günstiger Rahmenbedingungen, wie niedrigen Bauzinsen, und damit einhergehend steigenden Auftragszahlen und -werten (vgl. [Destatis, 2019d]) seit den 1990er Jahren deutlich niedriger als das Mittel aller Wirtschaftsbereiche [Destatis, 2019c, Code 81000-0017, Arbeitsproduktivität je Erwerbstätigen (im Inland)]. Wesentliche Ursachen dafür liegen in der Komplexität der Baubranche und der besonders in Deutschland stark fragmentierten, heterogenen Unternehmenslandschaft, wodurch die Adoption neuer Technologien und Denkansätze erschwert wird. Oftmals stehen noch historisch gewachsene und anerkannte Arbeits- und Denkweisen im Fokus. Die Chancen, die wirtschaftliche, gesellschaftliche und technologische Veränderungsprozesse im Rahmen der digitalen Revolution bieten, werden noch nicht vollständig erkannt und genutzt.

Deutlich wird dies an der langsamen Verbreitung und Einführung der seit vielen Jahren bekannten Methodik des Building Information Modeling (BIM). Zu deren Anwendung sollen bspw. die Beteiligten in öffentlichen Infrastrukturprojekten erst ab dem Jahr 2020 verpflichtet werden [Niederdrenk u. Seemann, 2018, S. 13-16], [BMVI, 2015, S. 5].

Auch die Verbreitung von Lean-Ansätzen im Bauwesen befindet sich verglichen mit anderen Branchen noch immer auf einem niedrigen Niveau. Einen Grund dafür stellt der Unikatcharakter von Bauwerken und -projekten dar. Dieser wird hervorgehoben, anstatt die hinter der Herstellung liegenden, sich häufig wiederholenden Prozesse, die den Kern der Projektabwicklung bilden, in den Mittelpunkt zu stellen. Ihre präzise Planung und stetige Überwachung und Steuerung während ihrer Ausführung können jedoch maßgeblich zu der Erreichung der gewünschten Ergebnisse hinsichtlich der angestrebten Zielgrößen Qualitäten, Kosten und Termine beitragen [Verein deutscher Ingenieure, 2019, S. 4].

Bislang liegt zudem der Fokus von Unternehmen nicht primär auf den Kundenbedürfnissen, der Wertschöpfung und dem gemeinsamen Projekterfolg. Die Motivation dafür ist nicht rein intrinsisch, sondern auch markt- und auftraggeberseitig begründet, wie aus dem Preisdruck, der aus der – auch bei öffentlichen Auftraggebern gängigen – Vergabe an die billigsten und nicht die wirtschaftlichsten Bieter resultiert, deutlich wird [Hübner u. Müller, 2018, S. 6-8]. Nicht zuletzt steht das Fehlen bzw. die langsame Entwicklung passender Rahmenbedingungen, wie zur Anwendung innovativer Geschäfts-, Vertrags- und Vergütungsmodelle, bei denen Risiken fair verteilt werden, sowie den Entwicklungen angepasster Gesetze und Normen solchen Veränderungsprozessen im Weg.

Die Auswirkungen der aktuellen Art und Weise der Projektabwicklung zeigen sich sowohl in dem Nichteinreichen festgelegter Projektziele, als auch in aktivem auftragnehmerseitigem Claim- und damit verbunden auftraggeberseitigem Anti-Claim-Management, in konfrontativer und mangelhafter Kommunikation sowie in langwierigen Rechtsstreitigkeiten.

Diesen Umständen zu begegnen und zugleich mit der gesellschaftlichen Entwicklung schrittzuhalten, kann gelingen, indem die gesamte Baubranche ihre traditionellen Sichtweisen ablegt und auf Basis neuer, digitaler Technologien, Arbeits- und Denkweisen eine Transformation hin zu einer ganzheitlich prozessorientierten und digitalen Wertschöpfungskette vollzieht, die auf einer aufgeschlossenen, kooperativen Mentalität aller Beteiligten aufbaut. Gelingt dies, so besteht die Möglichkeit, die Projektabwicklung zu verbessern, die Produktivität und damit die Wertschöpfung zu steigern und abnehmende Arbeitskraft zu kompensieren. Die im Projektverlauf anfallenden Informationen bieten dabei großes Potential, durch ihre vernetzte, gesamtheitliche und digitale Erfassung und Auswertung effizienzsteigernd dazu beizutragen.

Die Deutsche Bundesregierung hat die Notwendigkeit eines solchen Wandels erkannt. Um diesen einzuleiten, fordert sie daher explizit die Einführung der BIM-Methodik, Standardisierungen und Normungen sowie die Verbesserung der Projektkommunikation über den gesamten Planungs- und Baubereich für den Infrastruktur- und Hochbau. [Bundesregierung der Bundesrepublik Deutschland, 2018, S. 8, 10]

Unterstützung der Bauausführung

Die Bauausführungsphase und deren Vorbereitung bieten große Potentiale hinsichtlich möglicher Produktivitäts- und damit Wertschöpfungssteigerungen, da die darin liegenden Prozesse wesentlicher Bestandteil der Wertschöpfungskette im Bauwesen sind. Sie werden jedoch bislang nur teilweise digital und weitestgehend manuell durchgeführt. In diesem Kontext steht deren digitale Unterstützung in der vorliegenden Dissertation im Fokus.

Aufgrund der Vielfältigkeit der Prozesse, deren komplexer Abhängigkeiten, heterogener Informationstypen und -strukturen und der vielen an der Ausführung Beteiligten mit ihren individuellen Interessen sind im Rahmen des Baustellenmanagements ein hohes Maß an Koordination, Steuerung und Überwachung und zielführende Werkzeuge dazu notwendig. Dies gilt nicht nur für die Prozesse selbst, sondern ebenso hinsichtlich der mit ihnen zusammenhängenden Personen-, Waren- und Informationsströme sowie der Kommunikation.

BIM und Lean Construction (LC) stellen zwei Ansätze dar, die durch eine digitale, bauwerkszentrierte Herangehensweise dabei helfen können, diese Prozesse zu optimieren, strukturiert durchzuführen, besser überwachen und steuern zu können und sie so zu stabilisieren. Auch können BIM und LC dazu beitragen, die Kommunikation der Beteiligten zu verbessern. Sie können zur Reduktion von Verschwendungen und Steigerungen von Effizienz und Produktivität führen. Sie umfassen jeweils eine Vielzahl an Methoden, Prinzipien und Werkzeugen. Aufgrund ihrer Komplexität erfordert ihr vollständiges Verständnis zudem ein hohes Maß an Fachwissen. Für ihre gesamtheitliche, zielführende und nachhaltige Einführung in Unternehmen und Projekten sind daher umfangreiche Konzepte notwendig. Beide Ansätze sind dabei nicht nur auf die Bauphase und -prozesse beschränkt, sondern vielmehr als ganzheitlich über Projekte, Beteiligte und alle Unternehmensebenen hinweg zu denken und zu implementieren. Sie werden – obwohl bereits seit vielen Jahren bekannt (s. 2.3 u. 2.4.1) – derzeit in der Praxis nicht flächendeckend und noch immer selten ganzheitlich angewandt [Goschy u. Kurz, S. 39], [Niederdrenk u. Seemann, 2018, S. 18].

Die Anwendung der BIM-Methodik und der Methoden und Werkzeuge der LC ist mit dem arbeitsintensiven Erfassen, Verarbeiten und Auswerten einer großen Menge an Daten und darauf basierender Informationen verbunden und erfordert eine detaillierte Kenntnis der Bauprozesse. Während der Bauausführung herrschen i. d. R. zudem ein großer Termindruck und eine hohe Arbeitsbelastung der Bauleitung. Diese muss die zeitintensiven und fehleranfälligen Vorgänge der Datenaufnahme, -verarbeitung und -auswertung meist gemischt analog/digital durchführen. Eine gängige Vorgehensweise ist es dabei, mit Stift und Papier erfasste Daten manuell in (Standard-) Software einzugeben, dort auszuwerten und im Anschluss bspw. über Ausdrucke zu visualisieren. Zwar existieren auch Softwarelösungen zur Unterstützung des Baustellenmanagements, wie zur Aufnahme von Mängeln oder zur Planung und Visualisierung von Bauabläufen. Auch werden vereinzelte Lösungen zur digital unterstützten Anwendung ausgewählter

LC-Prinzipien (vgl. 3.2.2) angeboten. Eine Einordnung in einen übergeordneten, gesamtheitlich digitalen Projektkontext und in die BIM-Methodik bieten diese jedoch nicht oder nur oberflächlich. Zudem werden bekannte LC-Ansätze in kaum veränderter Weise digitalisiert, anstatt weiterführende Möglichkeiten digitaler Technologien auszuschöpfen.

Taktplanung und Taktsteuerung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird in diesem Kontext die Taktplanung und -steuerung als wichtige Methode aus der LC zur Organisation und Steuerung untersucht (vgl. [Verein deutscher Ingenieure, 2019, S. 82-85]), da für sie keine umfassenden, ganzheitlichen Softwarelösungen existieren.

Aufgabe der Taktplanung ist die Festlegung definierter Arbeitsbereiche, die von den Gewerken in einer vorgegebenen Sequenz und Dauer (Takt) durchlaufen werden. Sie erfolgt auf Grundlage von Informationen über Herstellungsprozesse, Ressourcen und das Bauwerk. Diese zu einer homogenen Planung zu verarbeiten erfordert viele Schritte, die i. d. R. nur rudimentär digital durchgeführt werden – bspw. durch Tabellenkalkulationssoftware. Treten Änderungen auf, müssen sie größtenteils erneut durchlaufen werden. Neben den aufwändigen Berechnungen sind Absprachen mit vielen Beteiligten notwendig, die die Komplexität weiter erhöhen.

Bei einer nach dem Taktungsansatz geplanten Bauausführung erfolgt die auf der Taktplanung aufbauende Steuerung der Bauprozesse im Wesentlichen durch Nutzung von Taktsteuerungstafeln. Diese zeichnen sich durch eine strukturierte und übersichtliche Darstellung einer Vielzahl heterogener Informationen aus. Ihr Einsatz ist dann zielführend, wenn sie stets den aktuellen Stand der Baustelle abbilden. Die Aktualität dieser Darstellung ist dabei direkt von der Größe der Aktualisierungsintervalle abhängig. Alle i. d. R. in Papierform an einer Tafel angehefteten Informationen müssen regelmäßig von Mitarbeitenden der Bauleitung aufbereitet, zusammengestellt und aktualisiert werden. Diese Tätigkeiten haben in der Praxis einen großen Anteil manueller und zeitintensiver Arbeitsschritte. Im ereignisreichen Baustellenalltag stellt dies eine große Herausforderung und Arbeitsbelastung dar.

1.2 Zielsetzung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, anhand eines flexibel gestalteten Softwaresystems Möglichkeiten zur digitalen Transformation der Taktplanung und Taktsteuerung unter Anwendung der und Einbindung in die BIM-Methodik aufzuzeigen. In [Verein deutscher Ingenieure, 2019, S. 82] wird als Ziel der Taktplanung und -steuerung die Schaffung einer hohen Planungssicherheit und Stabilität der Bauprozesse benannt. Bestehende Prozesse in der Taktplanung und -steuerung sollen daher mit dem vorgestellten System gestützt auf digital vorliegenden Informationen restrukturiert, optimiert und stabilisiert werden können. An diesem Beispiel soll verdeutlicht

werden, wie digitale LC-Werkzeuge zur Steigerung der Produktivität sowie zur Reduktion des Arbeitsaufwandes in der Bauausführung und Arbeitsvorbereitung gestaltet werden können. Es soll ein Beitrag zur digitalen und vernetzten Baustelle geleistet werden, der als ein Bestandteil in die Schaffung einer gesamtheitlich digitalen Wertschöpfungskette Bau eingeordnet werden kann.

Dabei soll das Bauwerk in den Mittelpunkt gerückt werden, da seine Herstellung die eigentliche Schöpfung des Wertes für den Kunden darstellt. Durch die Nutzung digitaler Methoden soll die Informationserfassung und -verarbeitung stärker automatisiert werden können. Damit sollen Zeitersparnisse und die Reduktion von Fehlerquellen in den Bauprozessen erreicht sowie Verschwendungen erkannt und eliminiert bzw. reduziert werden können. Die digital vorliegenden Informationen sollen überdies dazu genutzt werden können, die teils komplexen Abhängigkeiten sowohl in der Taktplanung, als auch bei der Taktsteuerung erkennen und im Sinne des visuellen Managements darstellen zu können. Dies soll mithilfe des hier vorgestellten neuen, ganzheitlichen Softwaresystems GAnzheitliche DiGitale Erweiterte Taktung (GADGET) zur Taktplanung und -steuerung erreicht werden.

Im Rahmen der Taktplanung soll dabei durch die Softwareanwendung GAnzheitliche DiGitale Erweiterte TaktPlanung (GADGET.P) gezeigt werden, wie die Erweiterung bestehender und Zuhilfenahme neuer, digitaler Werkzeuge, dazu dienen kann, die iterativen Prozessschritte des Definierens von Takten und Gewerkesequenzen zu unterstützen. Unter Berücksichtigung und automatischer Analyse komplexer Abhängigkeiten der verschiedenen Informationstypen (räumliche Festlegung von Taktabschnitten, Definition von Taktdauer und benötigten Ressourcen) sollen dazu eine visuelle Programmiersprache und automatisiert ablaufende Prozesse dienen. Darüber hinaus soll anhand von weiterführenden Ansätzen aufgezeigt werden, wie die gesamte Taktplanung digital unterstützt werden kann.

Um den Herausforderungen in der Taktsteuerung zu begegnen, wird in dieser Arbeit eine zweite Softwareanwendung, GAnzheitliche DiGitale Erweiterte TaktSteuerungstafel (GADGET.S), vorgestellt, die die Funktionalitäten analoger Taktsteuerungstafeln umfassen und sie darüber hinaus erweitern soll. Sie soll alle Schritte von der Datenaufnahme über die Datenaufbereitung und die Darstellung der daraus gewonnenen Informationen bis hin zur Unterstützung derer Interpretation abdecken. Als digitales Werkzeug soll sie zudem neue Möglichkeiten zur Darstellung von Inhalten und zur Kommunikation schaffen. Informationen sollen ohne Verzögerung wiedergegeben, neue Interaktionsmöglichkeiten geschaffen und verschiedene Detaillierungstiefen kontextbezogen visualisiert werden können. Weiterhin ist es ein Ziel, ein vernetztes System zu schaffen, bei dem die Informationen zentral verwaltet werden können. Der Zugriff darauf soll zeitgleich von verschiedenen Orten und Personen erfolgen können. So soll auch die Kollaboration und Kommunikation im Sinne der BIM- und LC-Ansätze (vgl. [Verein deutscher Ingenieure, 2019, S.19]) gefördert werden. Der Umfang der darzustellenden Inhal-

te soll flexibel und projektspezifisch anpassbar sein. GADGET.S soll es nicht nur ermöglichen, die direkten Baustellensteuerungsprozesse abzudecken, sondern auch als Informationsbasis für weitere Anwendungsfälle, wie Besprechungen mit dem Management oder zur Bereitstellung ausführungsrelevanter Informationen für Vorarbeiter und Arbeitskräfte dienen. Auch die Dokumentation des Bauablaufs soll unterstützt werden. Das System soll darüber hinaus modular und erweiterbar aufgebaut sein. Aufgrund der Nutzung durch verschiedenste Projektbeteiligte (vom Bauherrn über Projekt- und Bauleitung, Nachunternehmer bis hin zu Arbeitskräften) soll GADGET.S weiterhin einen Ansatz zur Schaffung eines gemeinschaftlichen Arbeitens darstellen und dazu beitragen mehr Transparenz auf der Baustelle zu schaffen.

Ein weiteres Ziel dieser Arbeit ist es, über die Konzeptionierung hinaus aufzuzeigen, wie die Anwendung von GADGET.S praktisch erfolgen kann. Dazu wird die Vorgehensweise bei der Einrichtung und Nutzung beschrieben und eine Integration in den BIM-Abwicklungsplan (BAP) vorgenommen.

An dem Beispiel von GADGET soll auf übergeordneter Ebene verdeutlicht werden, wie Software-systeme im Rahmen einer digitalen Transformation im Bauwesen unter Nutzung von Synergien der gemeinsamen Anwendung von BIM und LC eine Basis für Produktivitätssteigerungen schaffen und allgemein zur Verbesserung aktueller Arbeitsweisen beitragen können.

1.3 Aufbau der Arbeit

Anhand der Kapitelstruktur geben Abbildung 1-1, Abbildung 1-2 und Abbildung 1-3 eine erläuternde Übersicht über den Aufbau dieser Dissertation.

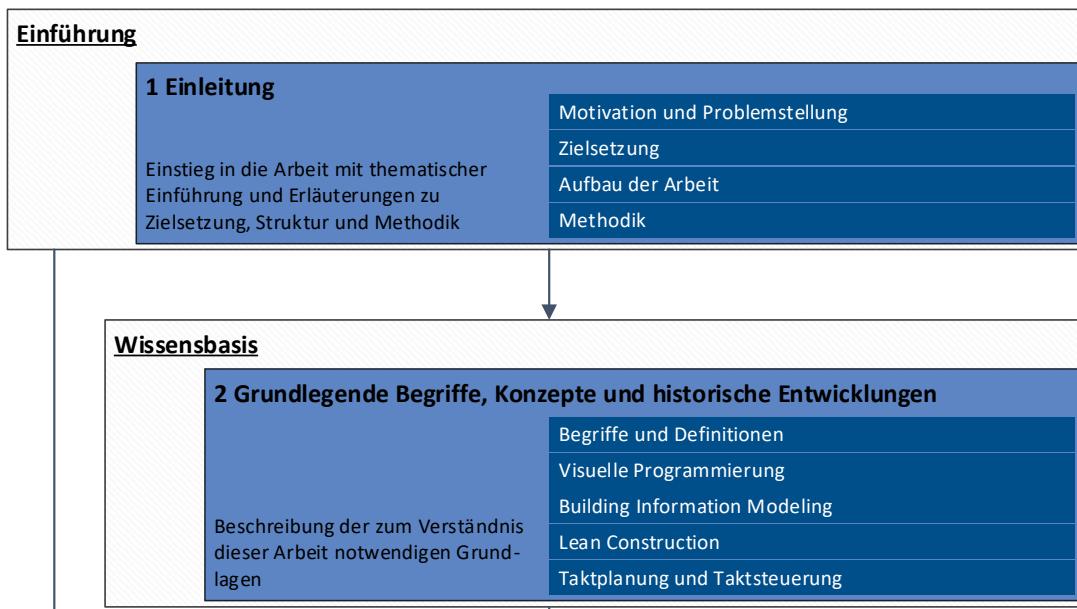


Abbildung 1-1: Aufbau dieser Dissertation – Teil 1 (Eigene Darstellung)

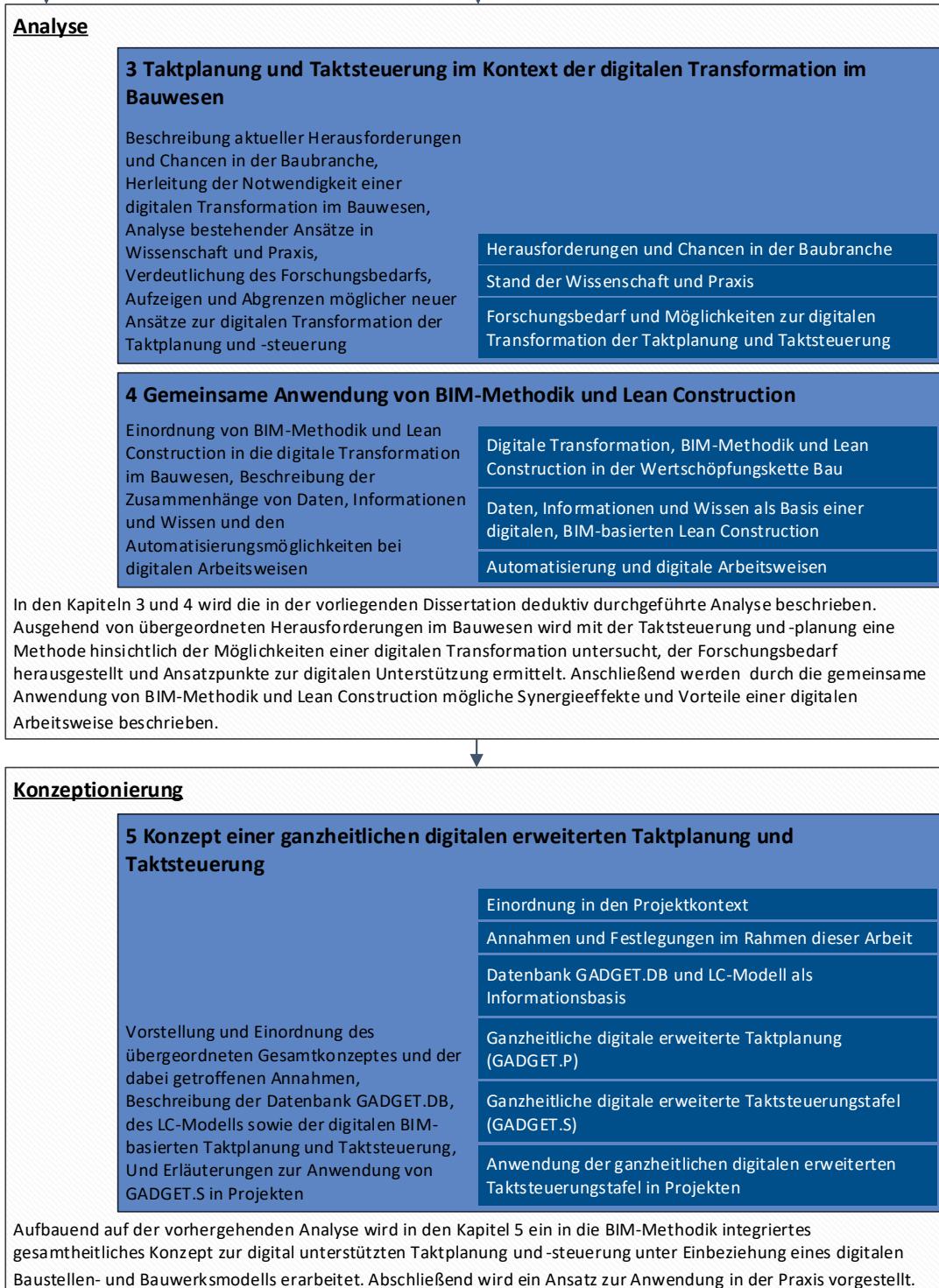


Abbildung 1-2: Aufbau dieser Dissertation – Teil 2 (Eigene Darstellung)

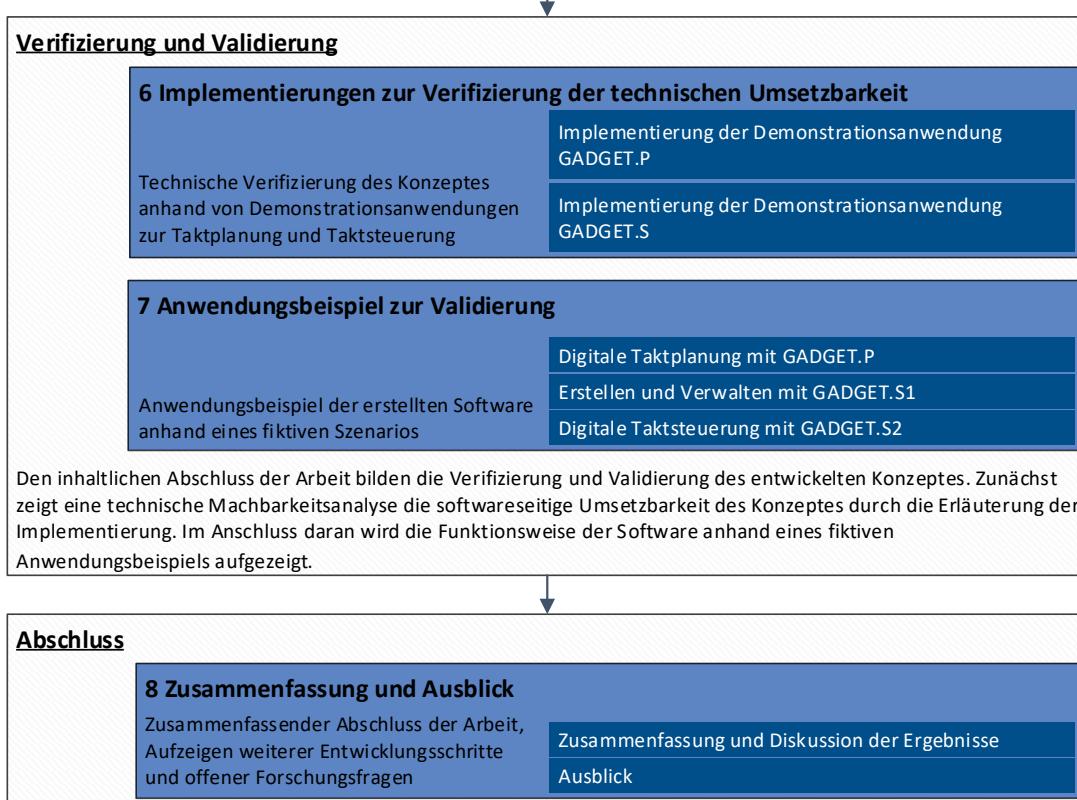


Abbildung 1-3: Aufbau dieser Dissertation – Teil 3 (Eigene Darstellung)

1.4 Methodik

Im Folgenden wird die Vorgehensweise der Erstellung dieser Dissertation beschrieben. Dabei wird zunächst die angewandte Methodik und im Anschluss daran das Konzept zur Bewertung der Ergebnisse beschrieben.

Problemidentifizierung und methodische Vorgehensweise

Zu Beginn der Bearbeitung wurde die Festlegung getroffen, dass Problemstellungen aus dem Bereich der Baupraxis unter Anwendung des LC-Ansatzes dahingehend untersucht werden sollten, welche Möglichkeiten hinsichtlich des Einsatzes digitaler Methoden und Technologien zur Verbesserung bestehender Arbeitsweisen eingesetzt werden können. Aufbauend darauf wurden Recherchen hinsichtlich der Überschneidungen und Synergien zwischen den Ansätzen der BIM-Methodik und der LC durchgeführt. Dazu fanden neben Literaturrecherchen Gespräche mit Fachleuten aus Baupraxis¹ und Wissenschaft sowie Konferenzbesuche statt. Auf Basis dieser Untersuchungen wurde die Taktsteuerung und Taktplanung als eine verbreitete und anerkannte Methode aus der LC identifiziert, die durch die Nutzung digitaler Ansätze und insb. der BIM-

¹ u. a. Leiter digitale Transformation & LC, BIM-Manager, Bauleiter und Bauleiterin aus vier Bauunternehmen mit je mehr als 350 Mitarbeitenden und kleineren mittelständischen Bauunternehmen

Methodik unterstützt werden kann. In diesem Kontext wurde durch weitergehende Recherchen auf dem Gebiet der Taktplanung und -steuerung festgestellt, dass diese bislang nicht vollständig digital und BIM-basiert durchgeführt werden. Aus Gesprächen und Vorträgen wurde zudem ersichtlich, dass Unternehmen erste Ansätze dahingehend untersuchen und großes Interesse an der Thematik besteht.

Im Anschluss an die darauffolgende Untersuchung bestehender Softwarelösungen hinsichtlich ihrer Einsatzmöglichkeiten zur Taktsteuerung und Taktplanung wurden – angelehnt an die Methodik des Requirements Engineering in der Softwareentwicklung – Anwender des zu erstellenden Systems identifiziert und Software- und Hardwareanforderungen definiert, sowie daraus notwendige Funktionalitäten abgeleitet. Die darauf fußende Entwicklung eines Softwarekonzeptes fand mit einer in Teilen parallel dazu ablaufenden Untersuchung der programmiertechnischen Grundlagen sowie der Betreuung mehrerer studentischer Abschlussarbeiten auf diesem Themenfeld statt. Den Abschluss bildete eine Überprüfung des Konzepts in Form einer technischen Verifizierung und einer Validierung.

Verifizierung und Validierung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird zur Verifizierung des vorgestellten Softwarekonzepts dessen technische Umsetzbarkeit anhand mehrerer Demonstrationsanwendungen, die im Rahmen der Forschungsarbeiten zu dieser Dissertation entstanden sind, aufgezeigt. Anhand fiktiver Anwendungsbeispiele wird zur Validierung vorgestellt, wie die Software aus Anwendersicht in der Praxis eingesetzt werden kann.



2 Grundlegende Begriffe, Konzepte und historische Entwicklungen

Zur Schaffung einer einheitlichen Wissensbasis zum Verständnis der vorliegenden Arbeit werden in diesem Kapitel Definitionen und Abgrenzungen zugrundeliegender Begriffe gegeben. Anhand der Darstellung der historischen Entwicklungen der BIM-Methodik und der LC werden die dahinterliegenden Konzepte schrittweise vorgestellt. Weiterführende Quellen sind im Verlauf der Arbeit direkt in den jeweiligen Textabschnitten zu finden.

2.1 Begriffe und Definitionen

Sowohl in der Sphäre der Lean Construction, als auch in dem Kontext der Methodik des Building Information Modeling werden Begriffe häufig mit unterschiedlichen Bedeutungen und uneindeutig ausgelegt. Aus diesem Grund wird nachfolgend definiert, wie wichtige Begriffe in dieser Arbeit gebraucht werden. Insbesondere die im weiteren Verlauf aufgegriffenen Prinzipien, Methoden und Werkzeuge aus der LC werden häufig unterschiedlich eingeordnet und daher aufbauend auf [Verein Deutscher Ingenieure, 2012, S. 5-7] definiert.

Arbeitsweise

Nach [REFA-Consulting AG, c] beschreibt eine Arbeitsweise die individuelle, variierte „Art und Weise des Ausführens von Aufgaben durch den Menschen“ [REFA-Consulting AG, a].

BIM-Abwicklungsplan

Der BIM-Abwicklungsplan (BAP) – auch als BIM-Projektabwicklungsplan ([Liebsch u. Sautter, 2018, S. 2]) oder BIM-Ausführungsplan ([DIN SPEC 91391-1:2019-04, 2019, S. 5]) bezeichnet – stellt ein zentrales Dokument der BIM-basierten Zusammenarbeit in Projekten dar. Er wird im Rahmen der Projektabwicklung ständig an die sich ändernden Rahmenbedingungen, „Anforderungen, Vorgehensweisen, wechselnden Festlegungen und Erkenntnisse[n]“ angepasst [Liebsch u. Sautter, 2018, S. 2]. Sein Umfang wird in [Verein deutscher Ingenieure, 2018a, S. 3] beschrieben: „Der BIM-Abwicklungsplan legt die Ziele, die organisatorischen Strukturen und die Verantwortlichkeiten fest, stellt den Rahmen für die BIM-Leistungen und definiert die Prozesse sowie Austauschanforderungen der einzelnen Beteiligten.“

In [DIN EN ISO 19650-2:2019-08, S. 11] wird er allgemeiner als „ein Plan, in dem erläutert wird, wie die Aspekte des Informationsmanagements der Informationsbestellung vom Bereitstellungsteam durchgeführt werden“ beschrieben.

[Liebsch u. Sautter, 2018, S. 2] beschreibt darüber hinaus, dass der BAP „[...] immer in Verbindung mit dem projektspezifischen Organisations- und Projekthandbuch zu lesen [ist] und [...] für alle Projektbeteiligten [gilt].“

Common Data Environment (Gemeinsame Datenumgebung)

Common Data Environments (CDEs) (dt. *gemeinsame Datenumgebungen*) sind internetbasierte Plattformen zum Management von Prozessen und Informationen, die von Projektbeginn an über den gesamten Lebenszyklus von Bauwerken bestehen sollen. In [DIN SPEC 91391-1:2019-04, 2019, S. 9] wird ihre Funktion erläutert: „Ein CDE ist der zentrale Ablage- und Bezugsort für alle projektrelevanten Informationen. Dadurch werden Redundanzen vermieden, die Bearbeitung von Informationen verläuft koordiniert und aktuelle Daten sind jederzeit verfügbar. Informationen werden über strukturierte Schnittstellen (entsprechend DIN EN ISO 19650) ausgetauscht. Der Informationsaustausch und der Zugriff auf CDE-Funktionen erfolgt über das Internet. Alle Projektteilnehmer führen ihren projekt-spezifischen Informationsaustausch unter Nutzung der CDE durch. Dadurch sind Aufgaben und Projektstatus jederzeit an zentraler Stelle nachvollziehbar.“

Darüber hinaus werden CDE in [DIN EN ISO 19650-1:2019-08, S. 13] abstrakter beschrieben: „vereinbarte Umgebung für Informationen [...] für ein bestimmtes Projekt oder für ein Asset [...], um jeden Informationscontainer [...] über einen verwalteten Prozess zu sammeln, zu verwalten und zu verbreiten [...] Ein gemeinsamer Datenumgebungs-(CDE)-Workflow beschreibt die zu verwendenden Prozesse und eine gemeinsame Datenumgebungs-(CDE)-Lösung kann die Technologie zur Unterstützung dieser Prozesse bereitstellen.“

In [Verein deutscher Ingenieure, 2018c, S. 3-7] wird die Definition aus [DIN EN ISO 19650-1:2019-08] weiter detailliert. Die Mindestanforderungen an die Struktur eines CDE werden mit den in Abbildung 2-1 dargestellten Funktionsbausteinen beschrieben.

Methode

In [Verein Deutscher Ingenieure, 2012, S. 6] wird eine Methode als „bestimmte standardisierte Vorgehensweise, die einem Gestaltungsprinzip zugeordnet ist und zur Erreichung von Unternehmenszielen eingesetzt wird.“ beschrieben.

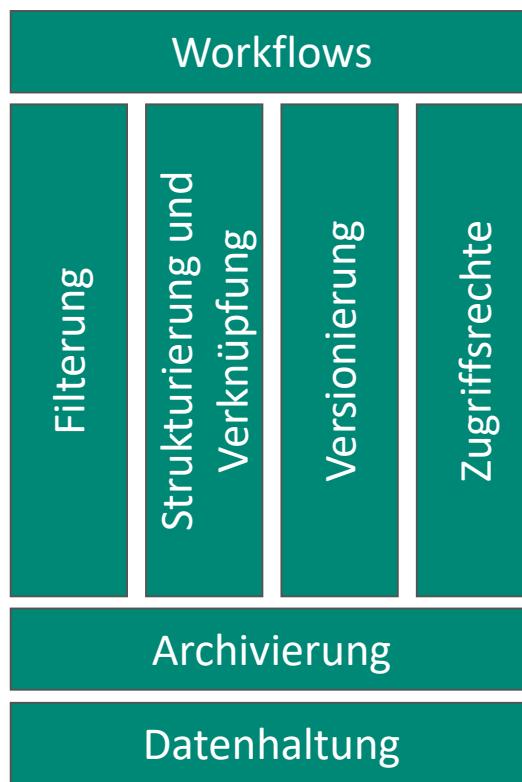


Abbildung 2-1: Übersicht der Mindestanforderungen an Bestandteile eines Common Data Environment (Darstellung nach [Verein deutscher Ingenieure, 2018c, S. 4])

Methodik

In Abgrenzung zur Methode ist der Begriff der Methodik allgemeiner gefasst. Er kann als „festgelegte Art des Vorgehens“ [Duden] verstanden werden und dabei mehrere Methoden oder Werkzeuge umfassen.

Prinzip

Prinzipien stellen nach [Verein deutscher Ingenieure, 2019, S. 5] feste und allgemeine Grundsätze dar. Diese sind Methoden und Werkzeuge übergeordnet. In [Verein Deutscher Ingenieure, 2012, S. 6] werden sie auch als Gestaltungsprinzipien beschrieben, die „inhaltlich ähnliche oder verknüpfte Methoden und Werkzeuge“ zusammenfassen und dazu dienen, „einen Themenbereich abzudecken, der zur Umsetzung von zusammengehörigen Unternehmenszielen dient“.

Werkzeug

Werkzeuge sind notwendig zur Anwendung bzw. Umsetzung von Methoden. Es handelt sich um standardisierte, physisch vorhandene Mittel [Verein Deutscher Ingenieure, 2012, S. 6]. In [Verein Deutscher Ingenieure, 2012, S. 6] wird dabei explizit die Zugehörigkeit von Software zu Werkzeugen benannt.

2.1.1 Wertschöpfungskette Bau und Produktivität

Wertschöpfungskette Bau

Im Gegensatz zum stationär produzierenden Gewerbe ist die Wertschöpfungskette im Bauwesen stark fragmentiert und individuell geprägt. Die große Varianz und Einmaligkeit der herzustellenden Güter – also der Bauwerke –, die sich auch in den verschiedenen Abteilungen des Baugewerbes zeigt (vgl. [Statistisches Bundesamt, 2008]), sowie vielfältige Projektkonstellationen und -abwicklungsformen lassen keine einheitliche und detaillierte Beschreibung einer allgemeingültigen Wertschöpfungskette im Bauwesen zu. Übergeordnet können jedoch einerseits die Leistungserstellungsprozesse in Unternehmen herangezogen werden, da in diesen die betriebliche Wertschöpfung geschieht. Andererseits kann eine auf das Bauwerk bezogene Wertschöpfungskette durch den Verlauf der einzelnen Projektphasen abgebildet werden, da von der ersten Idee an bis zur Abnahme der Baumaßnahme ein stetiger Wertzuwachs durch die Umwandlung von Input zu höherwertigem Output stattfindet. Die unternehmerischen Wertschöpfungsketten decken dabei i. d. R. nur Teile der Wertschöpfungskette in der Projektabwicklung und dem Betrieb ab. [Girmscheid u. Motzko, 2013, S. 13-15]

Produktivität und Arbeitsproduktivität

Produktivität kann sowohl volks- als auch betriebswirtschaftlich betrachtet werden. Im betriebswirtschaftlichen Sinn kann sie dabei auf Arbeit, Betriebsmittel und Material bezogen werden [REFA-Consulting AG, d]. Häufig wird Produktivität inhaltlich mit Arbeitsproduktivität gleichgesetzt [Weizsäcker, 2018]¹. Sie kann auf verschiedene Weisen über Quotienten ausgedrückt werden [REFA-Consulting AG, d; Weizsäcker, 2018]:

$$\text{Produktivität} = \frac{\text{Output}}{\text{Input}} = \frac{\text{Arbeitsergebnis}}{\text{Arbeitsaufwand}} \quad (2.1)$$

$$\text{Durchschnittliche Arbeitsproduktivität} = \frac{\text{Produktionsmenge}}{\text{eingesetzte Einheit des Faktors Arbeit}} \quad (2.2)$$

Produktivität drückt somit aus, wie hoch die Effizienz bei der Herstellung von Gütern und Erbringung von Dienstleistungen ist. Sie „wird in physischen oder ökonomischen Einheiten ausgedrückt – in Quantitäten (Volumina) oder Werten (monetäre Größen) –, und zwar basierend auf Messungen“ [EANPC, 2005, S. 12].

¹ Im Rahmen dieser Arbeit werden, falls nicht abweichend angegeben, die Begriffe der Produktivität und der Arbeitsproduktivität gleichgesetzt.

Die Betrachtung von Produktivität kann auf verschiedenen Ebenen erfolgen [EANPC, 2005, S. 12]:

- Volkswirtschaftlich
 - Gesamtwirtschaft
 - Wirtschaftssektor
 - Branche
- Betriebswirtschaftlich
 - Unternehmen
 - Werk
 - Arbeitsplatz

2.1.2 Abgrenzung von Digitalisierung, digitaler Revolution und digitaler Transformation

Digitalisierung, digitale Revolution und digitale Transformation werden zumeist nicht voneinander abgegrenzt und miteinander gleichgesetzt. Zur semantischen Differenzierung werden diese drei Begriffe nachfolgend entsprechend ihrer in dieser Dissertation verwendeten Bedeutungen beschrieben.

Digitalisierung

Der Begriff Digitalisierung steht im ursprünglichen Wortsinn für das Umwandeln analog vorliegender Inhalte in digitale, also aus diskreten Werten bestehende, Abbildungen derselben. Insbesondere ist darunter das Überführen analog vorliegender Daten in digitale Form zu verstehen, sodass diese weiterführend für digitale Systeme nutzbar gemacht werden. So können sie – theoretisch – zeitlich unbegrenzt persistent gespeichert, leichter und automatisiert verarbeitet, durchsucht und ausgewertet werden. Auch die Übermittlung digitaler Daten ist deutlich weniger zeit- und kostenintensiv², als in analoger Form. [Andreas Brandenberg, 2017]

Über die wörtliche Bedeutung hinausgehend wird Digitalisierung auch in dem Kontext der digitalen Abbildung von Prozessen und digitalen Datenerfassung und -auswertung verwendet. Dabei werden Arbeitsweisen hin zu einer Durchführung mit digitalen Werkzeugen und der Unterstützung durch digitale Systeme geändert. Die so definierte Digitalisierung umfasst keine Anpassungen der dahinterliegenden Prozessstrukturen selbst, wohl aber deren digitale und automatisierte Steuerung. Ein weiterer Bestandteil ist die Vernetzung von digitalen Systemen und damit von Menschen und Maschinen. [Ennemann, 2014, S. 4,6]

² Beispielhaft kann das Versenden eines Briefes mit dem Übermitteln einer E-Mail hinsichtlich dieser beiden Aspekte verglichen werden.

Digitale Revolution

Mit der digitalen Revolution³ wird der durch den weitverbreiteten Einsatz digitaler Technologien (vgl. [Müller, 2018]) seit dem Ende des 20. Jahrhunderts verbundene Umbruch in Gesellschaft, Wirtschaft sowie der Wissenschaft beschrieben [Drenth, 2001]. Eine Zusammenfassung des Umfangs der digitalen Revolution gibt [Bendel, 2018]. Dabei werden begrifflich die dritte und vierte industrielle Revolution in dem Kontext der digitalen Revolution abgegrenzt:

„[...] die auch als dritte Revolution bekannt ist, bzw. die digitale Wende. Im letzteren Kontext, der im vorliegenden Beitrag behandelt wird, werden nicht zuletzt ‘Informationszeitalter’ und ‘Computerisierung’ genannt. Während im 20. Jahrhundert die Informationstechnologie (IT) vor allem der Automatisierung und Optimierung diente, Privathaushalt und Arbeitsplatz modernisiert, Computernetze geschaffen und Softwareprodukte wie Office-Programme und Enterprise-Resource-Planning-Systeme eingeführt wurden, stehen seit Anfang des 21. Jahrhunderts disruptive Technologien und innovative Geschäftsmodelle sowie Autonomisierung, Flexibilisierung und Individualisierung in der Digitalisierung im Vordergrund. Diese hat eine neue Richtung genommen und mündet in die vierte industrielle Revolution, die wiederum mit dem Begriff der Industrie 4.0 (auch ”Enterprise 4.0“) verbunden wird.“ [Bendel, 2018]

Digitale Transformation

„Der Begriff ‘digitale Transformation’ beschreibt den Prozess eines rasanten und zugleich nachhaltigen Strukturwandels von Wirtschaft und Gesellschaft, der durch innovative Technologien, zunehmende Vernetzung und Digitalisierung vorangetrieben wird.“ [Ennemann, 2014, S. 4,6]. Dieser in dem Kontext der digitalen Revolution stattfindende Wandel stellt die gesamte Gesellschaft jetzt und in Zukunft vor vielfältige Herausforderungen. Diese sind nicht rein technischer Natur, sondern betreffen vielmehr Zivilgesellschaft, Wirtschaft, Politik und Wissenschaft im Einzelnen und erfordern insbesondere ihr kollaboratives Zusammenwirken. Die Digitale Agenda der deutschen Bundesregierung hat daher zum Ziel „Leitlinien der Digitalpolitik vor[zugeben] und bündelt Maßnahmen auf zentralen Handlungsfeldern, um den digitalen Wandel zu begleiten und mitzugestalten“ [BMWi, 2014]. Eine umfassende Einordnung dazu geben [Bär u. a., 2018a,b].

Ermöglicht wird die digitale Transformation durch tiefgreifende technologische Fortschritte bei der Entwicklung digitaler Technologien (vgl. z. B. [Oswald u. Krcmar, 2018, S. 11-34]) und Infrastrukturen – sowohl hardwareseitig, als auch auf Softwareebene. Die technologischen Möglichkeiten allein sind jedoch nicht ausreichend für das tatsächliche Auftreten des digitalen Wandels. Weder Wirtschaft, noch Wissenschaft, Politik oder Gesellschaft können ihn für sich allein

³ Anmerkung: Der Begriff der digitalen Revolution wird kontrovers diskutiert. Insbesondere muss in Frage gestellt werden, inwiefern alle Charakteristika einer Revolution erfüllt werden oder ob es sich vielmehr um eine Evolution handelt. [Feick, 2016], [Ennemann, 2014, S. 8-17]

genommen bewirken, da nur in ihrem Zusammenspiel nachhaltige Entwicklungen möglich sind. Dazu müssen Anreize und Motivatoren gefunden werden, die aufzeigen welche Mehrwerte auf dem jeweiligen Gebiet geschaffen werden können und welche Verwertungspotentiale bestehen. [Bär u. a., 2018a, S. 12]

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriff der digitalen Transformation auf Unternehmen und die digitalen Transformationen ihrer Prozesse, Geschäfts- und Wertschöpfungsmodelle bezogen (auch als „Digital Business Transformation“ bezeichnet). Wesentliche Bestandteile sind die Steigerung des Einsatzes digitaler Arbeitsweisen und Technologien und durch deren Anwendung mögliche Veränderungen in Unternehmen. Es ist zu berücksichtigen, dass nicht alle Prozesse und Werkzeuge zwangsläufig und automatisch von einer digitalen Abwicklung profitieren. Zudem sollten stets unternehmensumfassende Gesamtkonzepte vorhanden sein [Grzanna, 2018]. Ferner ist es entscheidend, Kunden in den Mittelpunkt zu stellen und Mitarbeitende über alle Unternehmensebenen hinweg einzubeziehen. [Bär u. a., 2018a, S. 11-19]

2.1.3 Wissen, Informationen, Zeichen, Daten

Für den Begriff „Wissen“ existiert keine allgemeingültige Definition. Er kann aus verschiedenen Blickwinkeln mit unterschiedlichen Bedeutungen betrachtet werden [Reinmann-Rothmeier u. Mandl, 2000]. Es kann bspw. nach implizitem oder explizitem, theoretischem und praktischem sowie nach prozedurellem („wissen wie“) oder deklarativem („wissen was“) Wissen unterschieden werden. Die nachfolgenden Definitionen lassen erkennen, dass Informationen stets die Grundlage zur Generierung resp. Beschreibung von Wissen bilden.

„[Wissen ist] die Gesamtheit der Kenntnisse und Fähigkeiten, die Individuen zur Lösung von Problemen einsetzen. Wissen basiert auf Daten und Informationen, ist im Gegensatz zu diesen aber immer an eine Person gebunden.“ [Gabler, 2018]

„Wissen ist somit die Vernetzung von Information, die es dem Träger ermöglicht, Handlungsvermögen aufzubauen und Aktionen in Gang zu bringen.“ [Haun, 2002, S. 100]

Die in Abbildung 2-2 dargestellte sog. Wissenspyramide ist ein Modell, das die Stufen der Wissensgenerierung aufzeigt. Die Wissenspyramide wird in der Literatur zumeist aus drei oder vier aufeinander aufbauenden Stufen zusammengesetzt. Die Grundlage bilden einzelne Zeichen, wie Ziffern, Buchstaben oder Sonderzeichen, ohne Zusammenhang. Werden diese mittels Syntax zu einer Zeichenfolge zusammengesetzt. So erlangen Sie einen Zusammenhang. Das Ergebnis sind Daten. Werden Daten mittels Semantik zu Informationen strukturiert, so erlaubt dies zielgerichtete Aussagen. Durch die Vernetzung von Informationen innerhalb eines Kontextes wird schlussendlich durch das Bewusstsein (individuelles) Wissen geschaffen. Nach [Ackoff, 1989] wird die sog. *DIKW hierarchy* beginnend bei Daten (engl. *Data*) über Informationen (engl. *Information*) und Wissen (engl. *Knowledge*) bis zu der Ebene der Weisheit (engl. *Wisdom*) erweitert (vgl.

auch [Rowley, 2007]). Zu beachten ist, dass die Grenze zwischen den beschriebenen Ebenen des Wissens und der Informationen unscharf ist, da eine exakte inhaltliche Trennung schwerfallen kann. [Haun, 2002, S. 100,177-179]

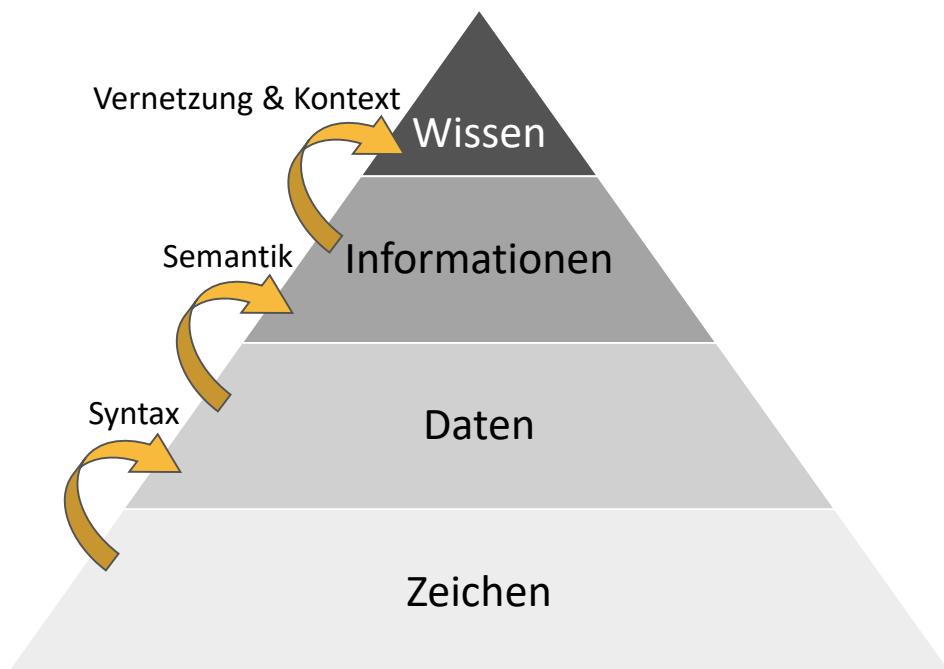


Abbildung 2-2: Wissenspyramide (Eigene Darstellung, erweitert in Anlehnung an [Haun, 2002, S. 177-179]

2.2 Visuelle Programmierung

In [Schiffer, 1998] werden Grundlagen und Klassifizierungsmöglichkeiten der bereits in den 1950er Jahren erstmals angewandten visuellen Programmierung beschrieben. Diese haben sich seit Veröffentlichung dieses Werks nicht verändert. Der wesentliche Ansatz wird zusammenfassend beschrieben:

„Visuelle Programmierung ist zu einem Synonym für intuitive und mühelose Softwareentwicklung geworden. Das Ziel visueller Programmierung ist vor allem die Erhöhung der Verständlichkeit von Programmen und die Erleichterung der Programmierung selbst. Durch visuelle Programmierung sollen auch Anwender in die Lage versetzt werden, Applikationen für den eigenen Bedarf zu erstellen, für deren Programmierung beim Einsatz konventioneller Werkzeuge und Sprachen professionelle Softwareentwickler benötigt würden.“ [Schiffer, 1998, S. 1]

Im Gegensatz zu den grundlegenden Prinzipien haben sich die visuellen Programmiersprachen stark weiterentwickelt und kommen auch in der Baubranche und im Speziellen in der Architektur immer häufiger zum Einsatz. [Wikipedia contributors, 2019] gibt eine Übersicht über die aktuelle Vielfalt visueller Programmiersprachen.

Funktionsweise visueller Programmiersprachen im Bauwesen

Im Bauwesen wird der Ansatz der visuellen Programmierung vor allem im Rahmen des parametrisierten Designs eingesetzt. Weiterverbreitete Softwareanwendungen dafür sind Dynamo, das zum parametrischen Modellieren meist in Kombination mit Autodesk Revit genutzt wird sowie das in der Software Rhinoceros 3D integrierte Grasshopper.

Zur Demonstration des in 5.4 vorgestellten Konzeptes zur digitalen BIM-basierten Taktplanung werden in der in 6.1 vorgestellten Demonstrationsanwendung beispielhaft die Softwareanwendungen Dynamo und Autodesk Revit eingesetzt. Daher wird das Prinzip der visuellen Programmierung an diesem Beispiel auf Basis von [Autodesk, f] beschrieben. Die geschilderten Strukturen und Funktionsweisen lassen sich aber auch in anderer Software, wie Grasshopper, wiederfinden. Tiefergehende, Dynamo-spezifische Funktionen werden in 6.1.1 dargelegt. In diesem Abschnitt werden auch Beispiele für Dynamo-Code gegeben.

„Die visuelle Programmierung folgt im Wesentlichen demselben Ablauf wie die Textprogrammierung. Beiden liegen dieselben Prinzipien der Formalisierung zugrunde. Die Anweisungen und Beziehungen des Programms werden jedoch über eine grafische („visuelle“) Benutzeroberfläche definiert. Sie geben keinen durch eine Syntax geregelten Text ein, sondern verbinden vordefinierte Blöcke miteinander.“ [Autodesk, i]

Das grundlegende Konzept der genannten visuellen Programmiersprachen besteht darin, einzelne Blöcke durch Verbindungselemente (in Dynamo als „Drähte“ bezeichnet) gerichtet miteinander zu verknüpfen (s. Abbildung 2-3). Das so entstehende Programm ähnelt einem gerichteten Graphen, bei dem Knoten durch Blöcke und Kanten als Verbindungselemente repräsentiert werden. Der Graph bildet damit den Datenfluss und die Programmlogik ab. Durch die eindeutige Definition von Input- (links) und Output-Seite (rechts) wird die Ablaufrichtung festgelegt. Die Dynamo-Engine basiert auf der textbasierten eigens für Dynamo entwickelten Programmiersprache DesignScript. DesignScript ermöglicht eine Umwandlung des über die grafische Benutzeroberfläche visuell erstellten Programmcodes in den zur Interpretation durch die Maschine benötigten textbasierten Quellcode und umgekehrt.

Blöcke repräsentieren Objekte, die Vorgänge ausführen. Dies kann vom einfachen Speichern von Inhalten bis zur Abbildung komplexer Funktionen reichen. Codeblöcke stellen spezielle Blöcke in Dynamo dar. Sie ermöglichen es, von der rein visuellen Programmierung hin zu einer textbasierten Programmierung in DesignScript zu wechseln. Dazu kann einerseits direkt DesignScript Code erstellt oder andererseits bestehende Blöcke in Codeblöcke umgewandelt werden.

Vorgehen bei der visuellen Programmierung

Die Erstellung visuellen Programmcodes erfolgt durch das grafische Erzeugen von Blöcken und Drähten in der grafischen Benutzeroberfläche von Dynamo. Neben der Erstellung eigener Code-

blöcke steht eine Auswahl vordefinierter Blöcke zur Verfügung. Die Blöcke können frei auf der grafischen Oberfläche platziert werden. Die visuelle Anordnung hat keinerlei Einfluss auf die Programmlogik, kann aber zur deren visueller Übersichtlichkeit beitragen. Wird Dynamo aus Revit heraus gestartet, so stehen über die Dynamo-spezifischen Funktionalitäten auch solche der Revit Programmierschnittstelle (engl. *application programming interface*, kurz API) bereit, die den Zugriff auf ein geöffnetes digitales Bauwerksmodell ermöglichen.

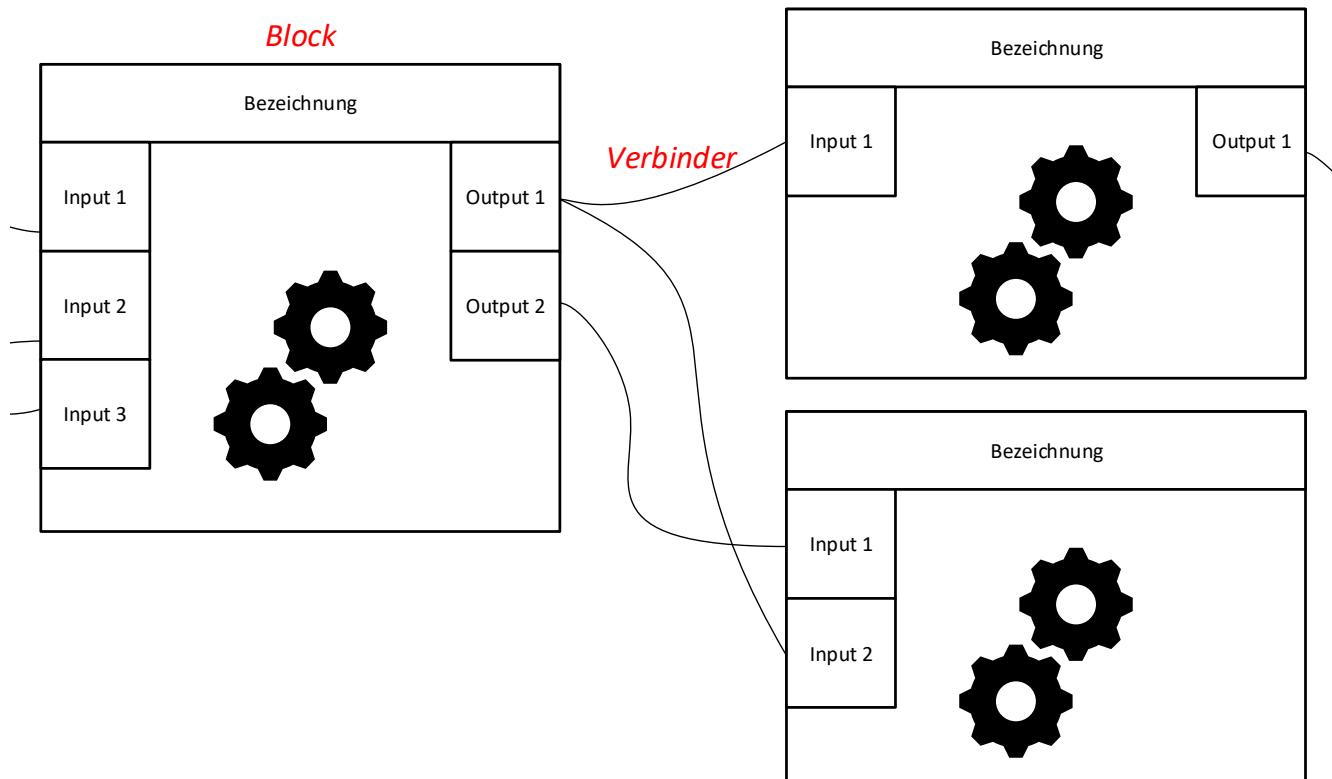


Abbildung 2-3: Schematische Darstellung visuellen Programmcodes (Eigene Darstellung)

2.3 Building Information Modeling

Im Jahr 1974 stellten Eastman u. a. ihren Entwurf eines „Building Description System“ vor [Eastman u. a., 1974]. Ihre Veröffentlichung gilt als erste Beschreibung der seit 1992 mit dem Begriff „Building Information Modeling“ (vgl. [van Nederveen u. Tolman, 1992]⁴) assoziierten Methodik bei der Bauwerke anstelle von Zeichnungen durch digitale, objektbasierte Beschreibungen ihrer Bauteile abgebildet werden. Es wird dargestellt, dass dies durch die Erfassung geometrischer (im dreidimensionalen Raum) und räumlicher Zusammenhänge sowie der Eigenschaften aller physischen Elemente und derer Verknüpfungen untereinander geschehen soll. Auch wurden bereits in dieser frühen Arbeit Ansätze der Notwendigkeit eines Konzeptes zur Darstellung

⁴ Anmerkung: In dieser Veröffentlichung wird die Terminologie „modelling building information“ verwendet. Der Begriff „building information modelling“ wird erst in darauf aufbauenden Veröffentlichungen erwähnt.

angemessener Detaillierungstiefen und viele der heute tatsächlich genutzten Vorteile dieser Arbeitsweise benannt. Unter anderem sind dies nach [Eastman u. a., 1974, S. 5-6]:

- Ableitung konsistenter, qualitativ hochwertiger Pläne zu geringen Kosten
- Quantitative Analysen, die direkt an das System gekoppelt sind
- Automatisierbare Überprüfungen, bspw. während des Entwurfs
- Ableitung von Plänen zur Ausführung und Ermittlung von Mengen
- Ableitung von Listen zur Produktion von Fertigteilen

Es wurden sowohl die Notwendigkeit der Beschreibung digitaler Bauwerksmodelle selbst, als auch eines ganzheitlichen methodischen Ansatzes herausgestellt.

Handelte es sich bei [Eastman u. a., 1974] noch um eine theoretische Arbeit, so findet die darin geschilderte Arbeitsweise seit Beginn des Jahrtausends mit stark zunehmender Verbreitung und unter stetiger Weiterentwicklung Anwendung in der Praxis. Wesentliche Faktoren dafür stellen leistungsfähige Computersysteme und die in den letzten Jahren zunehmenden Möglichkeiten des Cloud-Computing dar, die die Verarbeitung komplexer Modelle und damit einhergehender großer Datenmengen erlauben.

2.3.1 Differenzierung zwischen Modell und Methodik

Mit zunehmender Verbreitung der Arbeitsweise nahm auch die Anzahl an begrifflichen Definitionen und derer Auslegungen stark zu. „Building Information Modeling“, dessen sprachliche Nähe zu „Building Information Model“ und die gemeinsame Abkürzung „BIM“ machen daher zur Schaffung eines gemeinsamen Verständnisses stets eine klare Abgrenzung dahingehend notwendig, welche Begriffsdefinition in dem betrachteten Kontext gemeint ist. Mit [Verein deutscher Ingenieure, 2018a] ist ein Richtlinienentwurf zur Behandlung dieser Thematik derzeit in Bearbeitung.

Building Information Model - digitales Bauwerksmodell

Der Arbeitskreis Bauinformatik definiert ein Building Information Model als „Digitales Modell eines Bauwerks, das geometrische und semantische Informationen zu allen relevanten Bauobjekten, wie z.B. Bauteile, Baugruppen oder Räume, und deren Beziehungen für die Nutzung im Rahmen des gesamten Lebenszyklus in objektorientierter Form zur Verfügung stellt.“ [Arbeitskreis Bauinformatik]

Nach [Verein deutscher Ingenieure, 2018a, S. 3] handelt es sich bei einem Bauwerksmodell um eine „objektbasierte digitale Abbildung der physischen und funktionalen Eigenschaften eines Bauwerks“. Es wird die Anmerkung gegeben: „Es wird bei dem Begriff ‚Bauwerksmodell‘ nicht von einem monolithischen Gesamtmodell ausgegangen, sondern von der Koordination

mehrerer Fachmodelle einzelner beteiligter Fachplaner (Architekturmodell, Tragwerksmodell, TGA-Modell etc.). Das Bauwerksmodell ist in der Regel zentraler BIM-Bestandteil.”

Darüber hinaus werden in [Verein deutscher Ingenieure, 2018a] Definitionen für 3D-, 4D-, 5D-, As-Built-, Bestands-, Fach-, Koordinations-, Referenz-, Revisions-, Teil- und Volumenmodell gegeben (vgl. 2.3.2). Diese Vielzahl verschiedener Modelldefinitionen spiegelt die Vielfalt und Komplexität in der praktischen Arbeit mit Bauwerksmodellen wider und verdeutlicht die Wichtigkeit klarer Festlegungen im Sprachgebrauch.

Building Information Modeling - ganzheitlicher methodischer Ansatz

Mit den zu errichtenden Bauwerken stehen auch ihre digitalen Abbilder im Zentrum eines jeden Bauprojektes. Die BIM-Methodik kann somit als Teil des Wandels hin zu einer stärker digitalisierten Wertschöpfungskette in den Kontext der digitalen Transformation des Bauwesens eingeordnet werden und diesen fördern [Rambach, 2019, S. 4]. Es existiert eine große Anzahl an Beschreibungen des Begriffs mit unterschiedlichen Schwerpunkten. Nachfolgend werden vier ausgewählte Definitionen zitiert, die gemeinsam die wesentlichen Aspekte widerspiegeln.

Eine auf digitale Bauwerksmodelle ausgerichtete Definition gibt der Arbeitskreis Bauinformatik: „Prozesse zur Spezifikation eines Building Information Models und seine Verwendung, Verwaltung und Adaption im Rahmen des gesamten Lebenszyklus.“ [Arbeitskreis Bauinformatik].

In [BMVI, 2015] wird auf die kooperativen Aspekte und die Zusammenarbeit der (Projekt-) Beteiligten eingegangen: „Building Information Modeling bezeichnet eine kooperative Arbeitsmethodik, mit der auf der Grundlage digitaler Modelle eines Bauwerks die für seinen Lebenszyklus relevanten Informationen und Daten konsistent erfasst, verwaltet und in einer transparenten Kommunikation zwischen den Beteiligten ausgetauscht oder für die weitere Bearbeitung übergeben werden.“

Eine umfassende Beschreibung gibt [Rambach, 2019, S. 4]: „Kern der Methodik BIM ist die Erstellung von digitalen Bauwerksinformationsmodellen. Diese Datenmodelle werden zum besseren Verständnis der Baubeteiligten in der Regel mittels 3D visualisiert und beinhalten vordefinierte Elemente wie Bauteile und Räume. In einem integralen Planungsprozess werden dafür mit allen beteiligten Planern sukzessive die geometrischen Informationen festgelegt, mit den relevanten alphanumerischen Informationen angereichert und verknüpft. Sie beschreiben beispielsweise Material, Lebensdauer, umweltrelevante und sonstige Eigenschaften wie Schall-durchlässigkeit oder Brandschutzmerkmale. Räume werden auf Grundlage der sie begrenzenden Bauteile beschrieben. Ihnen können Eigenschaften wie zum Beispiel Volumen oder Nutzungsmöglichkeiten zugewiesen werden. Diese Informationen dienen als Datengrundlage während der Planung und werden während Realisierung, Inbetriebnahme, Betrieb und Erhaltung der Bauwerke kontinuierlich ergänzt, verwaltet und analysiert.“

Building Information Modeling wird in [Verein deutscher Ingenieure, 2018a, S. 4] als „Methode zur Planung, zur Ausführung und zum Betrieb von Bauwerken mit einem partnerschaftlichen Ansatz auf Grundlage einer zentralen Bereitstellung von Informationen zur gemeinschaftlichen Nutzung“ beschrieben. Anmerkend wird ergänzt: „Das Bauwerksmodell ist das primäre Werkzeug, das die Arbeitsweise unterstützt und der Verwaltung von Informationen dient (z. B. Zeit, Kosten, Nutzungsdaten). BIM ist kein Softwarepaket, sondern eine Arbeitsmethode, die sowohl die Projektsteuerung als auch die Zusammenarbeit in allen Lebensphasen eines Bauwerks erleichtert.“

Sprachlicher Gebrauch in dieser Arbeit

Im Rahmen der vorliegenden Ausarbeitung wird mit der Abkürzung „BIM“ die Methodik des Building Information Modeling gemäß den vorangegangenen Definitionen verbunden. Dies wird durch den Gebrauch der Formulierung „BIM-Methodik“ verdeutlicht. Modelle werden zur klaren Abgrenzung mit der deutschsprachigen Bezeichnung als digitale Bauwerksmodelle (allgemein, auf Bauwerke jeglichen Typs bezogen) oder digitale Gebäudemodelle bezeichnet.

2.3.2 Digitale Bauwerksmodelle

Digitale Bauwerksmodelle stellen die (Daten-) Basis zur Anwendung der BIM-Methodik dar. Sie können aus verschiedenen Perspektiven betrachtet unterschiedlichen Zwecken dienen. Aus informationstechnischer Sicht können sie als Datenbanken aller bauwerksspezifischen Informationen angesehen werden, aus Kundensicht repräsentieren sie digitale Abbilder des zu schaffenden Wertes, für Bauunternehmen dienen sie als Grundlage zur Produktionsplanung und im Betrieb können sie weitergenutzt zum digitalen Facility Management eingesetzt werden.

Fach-, Koordinations- und Teilmodelle

In der Literatur sowie in der Praxis existieren verschiedene Konzepte, nach denen Bauwerksmodelle klassifiziert werden. Grundlegende Unterscheidungen können dabei nach [Borrmann u. a., 2015, S. 212-213] hinsichtlich der Domänen (Fachperspektiven), Zonen (räumliche Einordnung), Detaillierungen (geometrische und semantische Informationstiefen) und Phasen (Zeitpunkt, Zweck, Status) des Modells getroffen werden. Weitere wichtige Unterscheidungen sind hinsichtlich Fach-, Teil- und Koordinationsmodellen zu machen. In [Verein deutscher Ingenieure, 2018a, S. 3] werden diese beschrieben:

Fachmodell: „Modell, das nach Domänen, Phasen oder nach räumlichen Bereichen unterteilt wird“

Teilmodell: „definierter Ausschnitt eines Fachmodells“

Koordinationsmodell: „Modell, das aus mehreren Fach- und/oder Teilmodellen zum Zweck der Abstimmung zusammengefügt wurde“

Teil- und Fachmodelle sind somit gewerkespezifisch und beinhalten alle von Fachplanern bereitgestellten und benötigten Informationen. Sie können zur Koordination gewerkespezifisch je nach Anwendungsfall in unterschiedlichen Konstellationen (in Koordinationsmodellen) zusammengefügt werden, sodass geometrische, funktionale oder inhaltliche Prüfungen zur Qualitäts sicherung durchgeführt werden können [Rambach, 2019, S. 11].

Modelldimensionen

In Wissenschaft und Praxis hat sich die Bezeichnung „nD“-Modell zum Ausdrücken der Art und des Umfangs der in den Modellen hinterlegten Informationen etabliert. Basis ist ein dreidimensionales geometrisches Modell (3D, zumeist in kartesischen Koordinatensystemen dargestellt). Die darüber hinausgehenden Dimensionen spiegeln keine physikalischen Größen dar. „4D“ repräsentiert in der Physik die Raumzeit, im Kontext des Building Information Modelings werden damit jedoch i. d. R. nicht konkrete Zeitangaben, sondern vielmehr Prozesse bzw. die dazugehörigen Termine ausgedrückt. Ebenfalls etabliert ist mit „5D“ die Verknüpfung von Kosten mit Bauwerksmodellen. Dabei kann dahingehend unterschieden werden, ob Kosten direkt mit dem Bauwerksmodell oder nur indirekt über Prozesse verknüpft sind. Weitere „Dimensionen“ können Lebenszyklusdaten, Betriebsdaten oder auch Logistikdaten (vgl. [Leifgen u. Kujajewski, 2018]) darstellen.

Informations- und Detaillierungstiefen

Ein grundlegendes Prinzip aus der LC ist auch Grundlage in der praktischen Arbeit mit digitalen Bauwerksmodellen: die Einhaltung der „5R“. Demnach muss stets die richtige Information in der richtigen Detaillierung zur richtigen Zeit in der richtigen Menge (Umfang) am richtigen Ort vorliegen. Um die Beschreibung der richtigen Inhalte, deren Detaillierung und Umfang zu ermöglichen, werden diese gemäß eines Modellentwicklungsgrades (vgl. [van Treeck, 2016, S. 58]) in Entwicklungsstufen (engl. *Levels of Development*, kurz *LoD*) eingeteilt. Wie auch bei der Klassifizierung von Modellen hat sich dieses Konzept etabliert, wird in der Umsetzung jedoch häufig unterschiedlich aufgefasst. So existieren verschiedene in der Praxis angewandte Definitionen, wie in [Egger u. Liebich, 2013, S. 58-61], [Verein deutscher Ingenieure, 2018b, S. 7-8] oder [Rambach, 2019, S. 9-10] beschrieben.

In [van Treeck, 2016, S. 58] wird eine auf diesem Konzept aufbauende, differenziertere Unterscheidung vorgestellt. Die Autoren unterscheiden zwischen aus Geometrie (LoG) und Informationsgehalt (LoI) bestehenden Modellinhalten sowie zur Beschreibung der Modellqualität

und Abstimmung notwendigen Informationen bzgl. der Koordination (LoC) und Logistik (LoL). Diese vier Kategorien bilden gemeinsam den Modellentwicklungsgrad (LoD).

2.4 Lean Construction

2.4.1 Entstehungsgeschichte der Lean Construction

Die Entwicklung des heute als Lean Construction (LC) oder Lean Construction Management bekannten Ansatzes im Bauwesen hat ihren Ursprung zu Beginn des 20. Jahrhunderts und kann in mehrere Stufen gegliedert werden, die im Folgenden umrissen werden.

Der selbstdäig reagierenden Webstuhl

Den Ursprung der Entwicklung des Lean-Ansatzes bildet Sakichi Toyodas Entwurf eines „selbstdäig reagierenden Webstuhls“, der bei Fehlern automatisch stoppt. Damit legte er im Jahr 1903 den Grundstein für das erste Prinzip, das noch heute im Toyota Produktionssystem und Lean Management Anwendung findet: die Autonomation (autonome Automation) [Toyota Industries Corporation]. Dieses unter dem japanischen Begriff Jidōka bekannte Prinzip beschreibt den Ansatz, dass Maschinen sich selbst überwachen und eigenständig auf Systemänderungen reagieren können, indem sie zwischen normalen und anormalen Bedingungen unterscheiden [Ōno u. a., 2013, S. 40]. Dadurch können Überproduktion und die Herstellung fehlerhafter Produkte als wesentliche Verschwendungsarten beseitigt werden [Ōno u. a., 2013, S. 42]. Die Autonomation ermöglichte es, die Aufsicht über Maschinen derart zu ändern, dass Maschinenbediener nur bei Störungen eingreifen müssen und daher mehrere Maschinen gleichzeitig überwachen können [Ōno u. a., 2013, S. 40].

Vom selbstdäig reagierenden Webstuhl zum Toyota Produktionssystem

Sakichi Toyodas Sohn, Kiichirō Toyoda, gründete 1937 die Toyota Motor Company und griff das Jidōka-Prinzip bei der Produktion von Automobilen auf [Ōno u. a., 2013, S. 40].

Mit der am 15. August 1945 verkündeten Kapitulation Japans endete nicht nur der zweite Weltkrieg⁵. Dieser Tag stellt ebenso den Beginn eines Transformationsprozesses dar, der seither Einfluss auf die Entwicklung der weltweiten Industrie genommen hat. Kiichirō Toyoda erkannte, dass es einen Wandel in der japanischen Automobilindustrie geben musste, wenn sie konkurrenzfähig zur amerikanischen und europäischen bleiben sollte. Er verkündete daher: „Wir müssen Amerika innerhalb von drei Jahren einholen. Sonst wird die Autoindustrie Japans nicht überleben.“ [Ōno u. a., 2013, S. 36]. Eine wesentliche Herausforderung bestand darin, dass der japanische Automobilmarkt nicht die Fertigung großer Stückzahlen weniger Modelle, son-

⁵ Formell wurde diese mit der Unterzeichnung am 02. September 1945.

dern dementgegen die vieler Modelle in geringer Stückzahl erforderte. Um dem zu begegnen, entwarf Taiichi Ōno auf Vorgabe Kiichirō Toyodas hin das auf Jidōka und dem Just-In-Time-Prinzip aufbauende Toyota Produktionssystem, das zum Ziel hat, die bestmögliche Qualität unter niedrigsten Kosten und kürzester Produktionszeit zu erreichen. Den Ausgangspunkt zu dessen Entwurf bildete Ōnos Identifikation von Verschwendungen als Hauptursache für die geringere Wirtschaftlichkeit gegenüber westlichen Unternehmen. Sein Ziel war es daher, ein System zu entwickeln, das die Elimination dieser Verschwendungen ermöglichen und somit die Wirtschaftlichkeit des Unternehmens steigern konnte [Ōno u. a., 2013, S. 37]. Ein wesentlicher Ansatz Ōnos war darüber hinaus, dass es einer stetigen Verbesserung und Weiterentwicklung des Systems bedarf, was im Japanischen mit Kaizen (Verbesserung, Veränderung zum Besseren) bezeichnet wird. Dass dieser Gedanke tatsächlich umgesetzt wurde, wird an dem in [Ōno u. a., 2013, S. 32-33] dargestellten Ausschnitt der Chronologie des Toyota Produktionssystems von 1945 bis 1975 deutlich. Darin werden die einzelnen Entwicklungsstufen in verschiedenen Bereichen, wie der Lagerung und Entnahme von Teilen oder der Umrüstung von Maschinen, sowie die dahinterliegenden Prinzipien zeitlich eingeordnet. Über die rein wirtschaftlich-technischen Aspekte hinausgehend steht sowohl bei dem Toyota Produktionssystem, als auch bei den daraus abgeleiteten Lean-Ansätzen der Mensch im Mittelpunkt:

„Dieses Konzept mit der gleichzeitigen Betonung des Respekts vor dem Menschen, der vom ehrenwerten Toyoda Sakichi (1867 – 1930), dem Gründer des Unternehmens und großartigen Erfinder, seinem Sohn Kiichirō Toyoda (1894 – 1952), dem ersten Präsidenten der Toyota Motor Company und Vater des japanischen Personenwagens, weitergegeben wurde, stellen die Grundlage des Toyota Produktionssystems dar.“ [Ōno u. a., 2013, S. 28].

Der *Respekt vor dem Menschen* bezieht sich einerseits auf die an der Produktion beteiligten Menschen. Andererseits sind damit ebenso die Kunden gemeint, die nicht mehr als „abstrakte Masse“ sondern mit ihren individuellen Bedürfnissen gesehen werden müssten [Ōno u. a., 2013, S. 29].

Innerhalb Japans (Automobil-) Industrie wurde dem Toyota Produktionssystem jedoch erst nach der Ölkrise von 1973⁶ besondere Aufmerksamkeit geschenkt, als Toyota im Gegensatz zu vielen anderen Unternehmen trotz der Rezession höhere Gewinne als die Konkurrenz erzielen konnte [Ōno u. a., 2013, S. 34].

Vom dem Toyota Produktionssystem zu Lean Production

Das Toyota Produktionssystem erlangte ab 1990 insb. durch die auf einer mehrjährigen, detaillierten Studie aufbauende Veröffentlichung „The machine that changed the world“ von Womack u. a. [1990] weltweit Aufmerksamkeit. Darin wurden zum ersten Mal die „[...] Hintergründe des japanischen Erfolgs systematisch und unemotional entschlüsselt und damit entmystifiziert

⁶ Vgl. bspw. <https://www.boerse.de/boersenwissen/boersengeschichte/Die-Oelkrise-1973--66>, Zugriff: 28.05.2019

und für den Fachmann nachvollziehbar gemacht [...]” [Ōno u. a., 2013, S. 19-20] sowie die Terminologie „Lean“ eingeführt [Womack u. a., 1990, S. 4]. Es wird deutlich gemacht, dass es nicht einzelne Methoden oder Werkzeuge wie Jidōka oder Just-In-Time seien, die für sich allein genommen die höhere Produktivität und Wertschöpfung japanischer im Gegensatz zu westlichen Unternehmen in dieser Zeit erklärt. Auch Unterschiede in Lohnstrukturen oder persönliche Arbeitseinstellungen der Menschen waren keine entscheidenden Kriterien [Womack u. a., 1990, S. 9]. Vielmehr wird identifiziert, dass der Lean-Ansatz als eine gesamtheitliche Industriephilosophie mit „eigenen Denk-, Vorgehens- und Handlungsweisen, die das Verhalten der einzelnen Mitarbeiter prägen“ [Ōno u. a., 2013, S. 20-21] verstanden werden muss [Womack u. a., 1990, S. 198,225].

Aus den Erkenntnissen dieser Studie entstand der Ansatz der Lean Production und die Entwicklung ganzheitlicher Produktionssysteme (GPS) [Verein Deutscher Ingenieure, 2012, S. 2].

Ein wesentlicher durch diese Arbeit untermauerter Grund der in den 1990er Jahren beginnenden Verbreitung der Lean-Philosophie war der Wettbewerbsdruck, den japanische Unternehmen auf den US-amerikanischen und europäischen Markt ausübten. Hatte Taiichi Ōno in den 1940er Jahren noch nach Westen geschaut, um die Produktivitätsdifferenzen zu untersuchen, waren westliche Unternehmen gezwungen, die immer stärkeren Verluste am Markt gegenüber der fernöstlichen Konkurrenz zu erklären.

Von der Lean Production zu Lean Management und Lean Thinking

Mit der Ableitung der Terminologie Lean Production hat sich auch der Begriff des Lean Managements zur übergreifenden, allgemeinen Beschreibung des in vielen Branchen adaptierten Ansatzes entwickelt. Das Lean Management erstreckt sich über Arbeits- und Denkweisen, Prinzipien, Methoden und Werkzeuge. Es existieren viele aus unterschiedlichen Blickwinkeln entstandene Beschreibungen. Eine Zusammenfassung der wesentlichen Aspekte des Lean Managements gibt bspw. [Klanitz]:

„Lean Management ist ein Ansatz der kontinuierlichen Prozessoptimierung und umfasst die effiziente Gestaltung der gesamten Wertschöpfungskette. Mit Hilfe verschiedener Methoden, Verfahrensweisen und Denkprinzipien verfolgt das “schlanke Management” das Ziel, Prozesse zu harmonisieren und ein ganzheitliches Produktionssystem ohne Verschwendungen zu schaffen. Und das über alle Unternehmensbereiche hinweg.“

Zu den zentralen Aspekten des Ansatzes zählen sowohl die Kundenorientierung als auch die Kostensenkung. Verschwendungs potenziale sollen hierbei erkannt und eliminiert werden, so dass Werte ohne Vergeudung geschaffen und gepflegt werden können.

[...]

Hauptziel des Lean Managements ist es, sämtliche Prozesse und Aktivitäten so aufeinander abzustimmen, dass überflüssige Tätigkeiten (Verschwendungen) vermieden und ausgesiebt werden. Auch das Personal wird in die Lean-Management-Unternehmensphilosophie einbezogen, damit die Mitarbeitermotivation zielorientiert gestärkt wird.”

Aus dieser Definition geht implizit hervor, dass ein wesentlicher Aspekt des Lean-Ansatzes die Prozessoptimierung zur Sicherstellung eines konstanten Flusses ist. Dieser kann sowohl auf die (Teil-) Produkte selbst, als u. a. auch auf Informationen bezogen werden. Der Lean-Ansatz geht aber deutlich über die reine Prozessoptimierung hinaus, es werden nicht ausschließlich technische und wirtschaftliche, sondern auch menschliche und mentale Dimensionen im Rahmen einer übergeordneten Kultur („Lean Culture“) und Denkweise („Lean Thinking“) inkludiert. Auch wird der Begriff der Lean-Philosophie aufgegriffen, um dies auszudrücken. Dies verdeutlicht den Stellenwert und die Reichweite des Lean-Ansatzes, der über eine reine Methoden- und Werkzeugimplementierung hinausgeht und sich in den Köpfen aller Mitarbeitenden verankern soll.

Entstehung der Lean Construction

Für die Übertragung des Lean Managements auf das Bauwesen legte die Studie „Application of the New Production Philosophy to Construction“ von Koskela [1992] den Grundstein. Ihr Ziel war es, zu untersuchen, ob die Anwendung des Lean-Ansatzes Auswirkungen auf das Bauwesen haben könnte. Es werden die bisherigen Arbeitsweisen im Bauwesen analysiert und dargelegt, wie eine auf Lean Production bzw. dem Lean Thinking aufbauende Umsetzung einer “new production philosophy” mit der Anwendung neuer Methoden und Werkzeuge im Bauwesen gestaltet werden kann. Als zentrales Konzept wird beschrieben, dass die Sicht auf die Herstellungsprozesse verändert werden müsse. Es sollten nicht nur wie bis dahin üblich die wertschöpfenden Umwandlungsprozesse betrachtet werden, sondern ebenso die nicht wertschöpfenden Verschwendungen identifiziert werden. Nur so könne ein Fluss in den Herstellungsprozessen geschaffen werden. Auch wird aufgezeigt, dass zur Einführung einer solchen Änderung der Denk- und Arbeitsweisen vielfältige Herausforderungen und Hindernisse zu bewältigen seien. Als Gründe für die verhältnismäßig langsame Adaption in der Baubranche werden die spezifisch auf die industrielle (Massen-) Fertigung bezogenen und im Bauwesen nicht direkt übertragbaren Ansätze sowie der im Vergleich geringe internationale Wettbewerb genannt. [Koskela, 1992]

[Koskela, 1992] zeigt somit auf, dass eine Übertragung der Lean Production-Ansätze aus der stationären Industrie auf das Bauwesen hin zu einer auf Lean Thinking und Lean Management basierenden Lean Construction zielführend, jedoch nicht ohne Anpassungen möglich ist. Im Gegensatz zur stationären Industrie findet die Wertschöpfung im Bauwesen in Projekten mit stark variierenden Randbedingungen statt. Tabelle 2-1 ist ein Vergleich der stationären mit der Baustellenproduktion zu entnehmen.

Tabelle 2-1: Gegenüberstellung von Fertigungscharakteristika stationärer Produktion mit Baustellenproduktion (in Anlehnung an [Verein deutscher Ingenieure, 2019, S. 9])

	Stationäre Produktion	Baustellenproduktion
Ortsbezug	Arbeitssysteme sind ortsfest (stationär). Menschen und Maschinen arbeiten an vorgegebenen, festen Stationen. Produkte wandern dabei von Station zu Station.	Herstellungsorte von Bauwerken unterscheiden sich von Bauprojekt zu Bauprojekt. Auf der Baustelle wandern die Ressourcen fortlaufend durch das Bauwerk (Produkt ortsfest, Arbeitsstationen ortsveränderlich). Die Bauproduktion ist somit stark ortsveränderlich.
Äußere Einflüsse	Produktion erfolgt größtenteils innerhalb geschlossener, witterungsgeschützter Räume.	Herstellungsprozesse auf der Baustelle unterliegen stark schwankenden Einflüssen durch Witterung und Temperatur sowie weiteren äußeren Umweltbedingungen, wie engen Platzverhältnissen oder komplexen (innerstädtischen) Verkehrssituationen.
Organisation, Verträge	In der Regel werden langfristige Rahmenverträge mit Zulieferern abgeschlossen. Organisationsstrukturen sind dauerhaft.	Komplexe, meist projektbezogene Vertragsverhältnisse zwischen AG, AN & NU, selten Rahmenverträge. Die Organisationsstrukturen und Zusammensetzung der Beteiligten unterscheiden sich meist von Projekt zu Projekt.
Ablauf	Fertigungsproduktion erfolgt zu meist erst nach abgeschlossener und detaillierter Planung, dem Herstellen von Prototypen und dem Durchführen einer Testphase.	Üblicherweise findet baubegleitendes Planen statt, d. h. die Herstellungsprozesse beginnen, bevor die Detailplanung für das gesamte Projekt fertiggestellt ist.
Änderungen	Je nach Produkt können Änderungen nicht oder nur bis Beginn einer definierten <i>Frozen Zone</i> berücksichtigt werden.	Über die gesamte Leistungserstellungsphase hinweg können Änderungswünsche des Kunden auftreten, sodass die Herstellungsprozesse angepasst werden müssen.
Produkt- charakter	Produkte werden mehrfach, i. d. R. in Serie gefertigt.	Bauwerke sind zumeist Unikate. Dies gilt insb. dann, wenn ihre Rahmen- und Umweltbedingungen (Baugrund, Umwelt- und Nachbarschaftsverhältnisse etc.) eingezogen werden.

Wie in den folgenden Abschnitten gezeigt wird, können trotz dieser Unterschiede im Bauwesen große Teile der Prinzipien, Methoden und Werkzeuge aus der stationären Industrie und dem

übergeordneten Lean Thinking und Lean Management über alle Unternehmens- und Projekt-ebenen „abstrahiert, adaptiert und weiterentwickelt“ [Verein deutscher Ingenieure, 2019, S. 9] werden.

2.4.2 Lean Construction als ganzheitlicher Ansatz

Von einer grundlegenden Denkweise ausgehend umfasst die Lean Construction abstrakte, theoretische Prinzipien, die durch Methoden und konkrete Werkzeuge umgesetzt werden. Die Grenzen zwischen Prinzipien, Methoden und Werkzeugen sind dabei nicht immer scharf definierbar, sodass diese Begriffe teilweise synonym für dieselben Inhalte verwendet werden⁷.

Kann bereits die Anwendung einzelner Teile daraus einen Mehrwert schaffen, so ermöglicht eine ganzheitliche Implementierung die Nutzbarmachung tiefgehender Synergieeffekte zur Generierung weiterer Effizienzgewinne und eine tiefe Verankerung im Unternehmen. Wie allgemein im Lean Management üblich, sollten die Lean-Ansätze auch im Bauwesen über alle Unternehmensebenen und -bereiche hinweg durchgängig von allen Mitarbeitenden angewandt werden. Dasselbe gilt für die Anwendung über die gesamte Projektlaufzeit – und ggf. darüber hinaus den Betrieb des Bauwerks – und alle Projektteilnehmer. Es können zwar einzelne Phasen, wie die Bauphase, für sich allein genommen mit LC-Methoden und -Werkzeugen abgedeckt werden. Findet jedoch eine ganzheitliche Integration des Ansatzes von Projektbeginn an statt, so kann direkt ein Prozessdenken und das Bewusstsein für Kunden, Wert und Verschwendungen geschaffen werden. Dies vereinfacht die Anwendung der Methoden und Werkzeuge und schafft Akzeptanz für deren Einführung.

Wesentlich für eine solche Herangehensweise ist das Bekenntnis zu einer kooperativen Zusammenarbeit im Projekt und eine bindende, sachliche (vertragliche) Vereinbarung.

Begriffsdefinition

Zur Beschreibung der Ganzheitlichkeit des Lean-Ansatzes im Bauwesen werden in der Praxis verschiedene Begriffe und Einordnungen verwendet. Da in der vorliegenden Arbeit die Bauausführung im Mittelpunkt steht, wird verallgemeinernd die verbreitete Terminologie „Lean Construction“ verwendet, jedoch stets der gesamtheitliche Lean-Ansatz im Bauwesen adressiert. Es wird nicht zwischen Lean Management im Bauwesen (vgl. [Verein deutscher Ingenieure, 2019, S. 3]), Lean Construction, Lean Construction Management und Lean Design Management differenziert.

⁷ Im Rahmen dieser Arbeit werden die Definitionen und Vorgehensweisen nach [Verein deutscher Ingenieure, 2019] verwendet (s. auch 2.1).

2.4.3 Prinzipien

Als die drei grundlegenden Prinzipien der LC gelten die Fokussierung auf den Kunden, den für ihn durch Vermeidung von Verschwendungen effizient zu schaffenden Wert und eine kontinuierliche Verbesserung der eigenen Denk- und Arbeitsweisen. In der vorliegenden Arbeit kommt darüber hinaus den Fließ-, Pull-, Takt- und Null-Fehler-Prinzipien sowie dem visuellen Management ein besonderer Stellenwert zu, da diese die Grundlage für die betrachtete Taktplanung und -steuerung bilden.

Kundenprinzip, Wert, Wertschöpfung und Verschwendungen

Schon Taiichi Ōno erkannte den zentralen Stellenwert von Verschwendungen, des Kunden, seiner Individualität und seine zentrale Rolle zur Optimierung der Wertschöpfungsprozesse:

„Am Beginn des Toyota-Produktionssystems stand, wie ich bereits betonte, die gründliche Be seitigung aller Dinge, die Verschwendungen bedeuteten. Je weiter wir uns diesem Ziel näherten, umso klarer wurde das Bild von den Käufern mit individuell verschiedener Persönlichkeit. Die abstrakte Masse, die wir »Kunden« nennen, besitzt keine reale Substanz. Wir entdeckten, dass die Industrie Aufträge von jedem akzeptieren und Produkte herstellen muss, die sich je nach den individuellen Bedürfnissen unterscheiden.“ [Ōno u. a., 2013, S. 29]

Die Fokussierung auf den Kunden⁸ und die Erfüllung seiner Wünsche geht mit der Fragestellung nach dem für ihn zu schaffenden Wert einher. Dieser Wert ist nicht als rein wirtschaftliche Größe aufzufassen. Er repräsentiert all das, was dem Kunden einen Nutzen und Wertzuwachs bringt, wofür er also bereit ist zu zahlen [Fiedler, 2018b, S. 20], [Verein deutscher Ingenieure, 2019, S. 10]. In [Ballard u. Howell, 2015, S. 23] werden Tätigkeiten als wertschöpfend aus Sicht des Kunden definiert, wenn sie drei Bedingungen erfüllen: der Kunde ist bereit, dafür zu zahlen, sie ändern die Form oder Funktion des Produktes und die Tätigkeit wird beim ersten Mal fehlerfrei ausgeführt. Dieses Prinzip ist dabei nicht nur auf das herzustellende Produkt (Bauwerk) selbst beschränkt zu verstehen. Vielmehr muss es von allen Beteiligten über alle Unternehmensbereiche berücksichtigt werden [Fiedler, 2018a, S. 20].

Entsprechend dieser Definition von Wert und Wertschöpfung sind alle Tätigkeiten, die keinen Wertzuwachs für den Kunden erzeugen, als nicht wertschöpfend einzuordnen und somit zu eliminieren. Jedoch sind stets auch Prozesse erforderlich, die zwar nicht direkt zur Wertschöpfung beitragen, dafür jedoch benötigt werden. Es kann somit in

- wertschöpfende

⁸ Kunden sind der üblichen Bedeutung nach in der LC Auftraggeber. In Bezug auf die einzelnen Prozessschritte können aber auch andere Rollen, wie die nachgelagerten Gewerke, als Kunden mit spezifischen Anforderungen an das Arbeitsergebnis der vorangegangenen Tätigkeit gesehen werden.

- nicht wertschöpfende, aber notwendige (verdeckte Verschwendungen)
- nicht wertschöpfende und nicht notwendige (offensichtliche Verschwendungen)

Tätigkeiten unterschieden werden. Diese drei Kategorien lassen sich beispielhaft an der Herstellung von Stahlbetonbauteilen illustrieren. Wertschöpfend ist die eigentliche Herstellung, also das Bewehren und Betonieren des Bauteils. Notwendig ohne direkten Wertzuwachs sind das Ein- und Ausschalen oder der Transport der Materialien zum Herstellungsort. Nicht notwendige Vorgänge ohne Wertzuwachs sind Wartezeiten auf Materialien oder Nacharbeiten aufgrund mangelhafter Herstellung.

Üblicherweise wird im Bauwesen in Anlehnung an [Ōno u. a., 2013, S. 54] in die acht⁹ Verschwendungsarten

- Überproduktion
- Wartezeiten
- Transport
- Unnötige Bearbeitungsschritte
- Bestände
- Bewegungen
- Ausschuss und Nacharbeit
- Ungenutztes Mitarbeiterpotenzial

unterschieden [Verein deutscher Ingenieure, 2019, S. 12]. Diese können in verschiedenen Ausprägungen in allen Projektphasen und Prozessen auftreten, nicht nur im Rahmen der Herstellung. [Verein deutscher Ingenieure, 2019, S. 12] gibt dazu Beispiele aus der Bauplanung und Bauproduktion.

Zusammenfassung weiterer Prinzipien

Kontinuierliche Verbesserung: Die kontinuierliche Verbesserung und das damit verbundene Streben nach Perfektion stellen eine Säule des Lean Managements und damit der LC dar. Sie zielen auf einen kurzyklischen, kontinuierlichen Verbesserungsprozess (KVP) ab, durch den Prozesse unter Einbeziehung der Mitarbeitenden optimiert werden sollen, um so nachhaltig die Prozessqualität zu erhöhen. [Nesensohn u. Fiedler, 2018, S. 74], [Verein deutscher Ingenieure, 2019, S. 11]

Fließprinzip: Gemäß des Fließprinzips soll ein stetiger Fluss von Ressourcen und Informationen innerhalb aller Prozesse und über alle Projektphasen hinweg sichergestellt werden. Dieses aus

⁹ Die achte Verschwendungsart, ungenutztes Mitarbeiterpotenzial, wird von Ōno nicht explizit benannt und erst in späteren Arbeiten als solche erfasst.

der Fließbandproduktion stammende Prinzip ist insb. in den Planungs- und Herstellungsprozessen von Relevanz. Während der Ausführungsphase ist der Fluss der zur Herstellung durch die Gewerke benötigten Materialien und des Personals zu gewährleisten. Im Bauwesen werden acht Hauptflüsse unterschieden [Verein deutscher Ingenieure, 2019, S. 11]: Menschen, Informationen, gemeinsames Verständnis, Geräte, Materialien, Vorleistungen, sicherer Arbeitsplatz und äußere Bedingungen.

Pull-Prinzip: Das Pull-Prinzip stellt sicher, dass nur die benötigten (richtigen) Ressourcen und Informationen in der richtigen Menge als Input in Prozesse eingebracht werden. Dazu werden diese von dem nachgelagerten aus dem vorgelagerten Prozess *gezogen*, also nachfrageorientiert abgeholt. Mit dieser rückwärtsgerichteten Herangehensweise geht einher, dass die zu übergebenden Inhalte mit Beginn des nachgelagerten Prozesses bereitstehen müssen, der vorgelagerte Prozess also entsprechend abgeschlossen ist. [Verein deutscher Ingenieure, 2019, S. 10]

Taktprinzip: Das Ziel des Taktprinzips ist es, Arbeitsabläufe durch Einführung eines gleichbleibenden Rhythmus (Takt) zu harmonisieren, um so die Auslastung der Ressourcen auf ein gleichbleibendes Niveau zu bringen und Abläufe zu verstetigen. Diese Vorgehensweise ist besonders dann anzuwenden, wenn sich Arbeitsinhalte (bspw. in der Ausführungsphase herzustellende Bauteilgruppen) wiederholen und mehrere Beteiligte / Gewerke aufeinander aufbauende Tätigkeiten ausführen. Erreicht werden kann eine einheitliche Taktung in der Herstellung über die Anpassung der Personalstärke oder die Definition des Arbeitsumfangs (herzustellende Mengen je Takt). Durch die Definition von Takten wird eine konstante Arbeitsgeschwindigkeit realisiert, mit der alle Beteiligten ihre Arbeitsinhalte erzeugen. [Verein deutscher Ingenieure, 2019, S. 11]

Null-Fehler-Prinzip: Das Null-Fehler-Prinzip ist eng mit dem Ansatz des Strebens nach Perfektion und dem KVP verbunden. Sein Ziel ist es, eine hohe Qualität in den Prozessen und Arbeitsergebnissen sicherzustellen, indem Fehler nicht von Arbeitsschritt zu Arbeitsschritt weitergegeben werden. So kann vermieden werden, dass durch eine späte Fehlererkennung immer größere Folgeschäden entstehen. Im Sinne der Lean-Kultur steht dabei nicht das Hervorheben der Fehlerverursacher im Mittelpunkt. Vielmehr sollen die Ursachen analysiert werden, sodass die Fehler nicht erneut begangen werden. [Verein deutscher Ingenieure, 2019, S. 11]

Visuelles Management: Die Grundlage zur praktischen Anwendung aller Lean-Prinzipien bildet die transparente Visualisierung von Informationen [Verein deutscher Ingenieure, 2019, S. 12]. Dazu können die grafische Darstellung aktueller Kennzahlen in Diagrammform, die Visualisierung des aktuellen Baustellenstandes, räumliche Darstellungen der Arbeitsbereiche und die bspw. durch Steckkarten an Kanban Boards visualisierten Arbeitspakete genutzt werden.

Durch die grafische Darstellung der Arbeitsinhalte werden die Baustellenüberwachung und -steuerung unterstützt sowie eine effiziente Kommunikation im Projekt – bspw. in Besprechungen – ermöglicht, da Zusammenhänge verständlich und nachvollziehbar dargestellt werden.

2.5 Taktplanung und Taktsteuerung

Eine im Bauwesen bekannte und verbreitete Methode ist die Durchführung von Projekten auf Basis eingetakteter Abläufe. Dieser Taktungsansatz basiert auf der Idee, das Bauwerk in sich wiederholende Bereiche einzuteilen, die von den herstellenden Gewerken nacheinander durchlaufen werden können. So kann eine Struktur geschaffen werden, die es erlaubt, Arbeiten standardisiert und transparent überwachen und steuern zu können, um so der großen Komplexität in Bauprojekten begegnen zu können. Die Methode baut auf den Takt-, Fließ-, Pull- und Null-Fehler-Prinzipien auf. Transparenz wird durch die Anwendung des visuellen Managements geschaffen. Der Taktungsansatz wird in der Praxis häufig angewandt – auch ohne direkte Einordnung in die LC resp. das Taktprinzip. Bei Linienbauwerken findet er seit Langem und oft Anwendung – bspw. bei der Herstellung von Brücken mittels Taktschiebeverfahren oder im Tunnelbau [Binnerger u. Wolfbeiß, 2018b, S. 165].

Die Taktung der Baustelle umfasst die Taktplanung zur Vorbereitung sowie die Taktsteuerung während der Bauphase. Sie kann mit anderen Methoden und Werkzeugen aus der LC kombiniert werden. Insbesondere ergänzen sich die Taktplanung und -steuerung mit Projektsteuerungsräumen. In solchen können Taktsteuerungstafeln angebracht sowie Kennzahlen und weitere Informationen zum Baustellenstatus visualisiert werden. Sie befinden sich auf der Baustelle und dienen als Treffpunkt vor Ort für Besprechungen. So werden die gemeinsame, kollaborative Absprache der Bauprozesse und Erarbeitung der Takte unterstützt. [Verein deutscher Ingenieure, 2019, Tabelle A1, S. 74]

2.5.1 Taktplanung

Die Taktplanung bildet die Grundlage zur Abwicklung eines Bauprojektes nach dem Taktprinzip. Sie basiert auf einer Prozessanalyse, in der alle relevanten Arbeitsabläufe ermittelt und sich ähnelnde Arbeiten gemeinsam mit allen Beteiligten in sachlogische Blöcke zusammengefasst werden. Ihr Ergebnis ist eine harmonisierte Baustrategie mit einem festgelegten Arbeitsrhythmus (Takt), die eine örtliche sowie zeitliche Zuordnung der durchzuführenden Herstellungsprozesse und der dazu benötigten Ressourcen umfasst. Diese besteht aus Taktplänen (Zeit-Ort-Diagramme, in denen Gewerke den Taktabschnitten zugeordnet werden), einer grafischen Darstellung des Bauablaufs auf Basis der Bauwerksgeometrie (örtliche Festlegungen in Taktbereichen bzw. -abschnitten), Gewerkesequenzen und darauf aufbauenden Gewerkezügen.

Ablauf

Im Folgenden wird der in [Verein deutscher Ingenieure, 2019, S. 83] beschriebene Vorschlag zur Durchführung der Taktplanung aufgegriffen. Diese Herangehensweise ist nicht fest vorgeschrieben und kann je nach Projekt und Unternehmen individuell angepasst werden. Weitere „best

practice” Beispiele sind bspw. in [Binninger u. Wolfbeiß, 2018b, S. 165-168] und [Frandsen, 2016] beschrieben.

Die einzelnen Schritte der Taktplanung lauten nach [Verein deutscher Ingenieure, 2019, S. 83]:

1. Aktuellen Projektstatus feststellen
2. Rahmenbedingungen für den getakteten Bauablauf und der notwendigen Vorleistungen ermitteln und definieren
3. Wiederholbare Elemente identifizieren
4. Taktbereiche definieren
5. Genaue Gewerkesequenzen in sachlogischer Reihenfolge und Taktzeit definieren
6. Gewerkesequenzen in sog. „Waggons“ und „Abteile“ zu Gewerkezügen einteilen
7. Grobstrategie für den getakteten Bauablauf entwickeln (bspw. Anzahl der Gewerkezüge und Baurichtung)
8. Plausibilitätsprüfung der Taktzeit und Taktbereichsgröße auf Basis von Massen- und Aufwandswerten am Beispiel des Taktbereichs mit dem größten Leistungsinhalt durchführen
9. Ausführungszeiten der einzelnen Gewerke durch Anpassung der geplanten Arbeitsressourcen harmonisieren
10. Baustrategie durch Überführung der Arbeitsergebnisse in den Taktplan finalisieren
11. Abfolge der Ausbaubereiche abstimmen
12. Gewerkezüge synchronisieren
13. Abstimmung mit dem Rahmenterminplan

2.5.2 Taktsteuerung

Da es sich bei Baustellen um dynamische Systeme handelt, bedarf es einer stetigen und kurzzyklischen Überwachung und Steuerung der Herstellungsprozesse sowie der dazu notwendigen Ressourcen durch die Bauleitung, um die im Rahmen der Taktplanung definierten Arbeitsabläufe plangemäß umzusetzen [Binninger u. Wolfbeiß, 2018b, S. 168]. Bei getakteten Baustellen wird dazu die Methode der Taktsteuerung angewandt. Sie dient dazu, die Einhaltung der Takte sicherzustellen. Bei Abweichungen werden dazu zielgerichtete Maßnahmen angewandt, um am Taktende das anvisierte Arbeitspensum zu erreichen.

Die Grundlage zur Taktsteuerung bildet eine Vielzahl verschiedener Informationen – bspw. über den aktuellen Baufortschritt und geplante Arbeitspakete sowie den Baustellenstatus. Neben dem Taktplan und der visuellen Darstellung des Bauablaufs ist ein wesentliches Element die übersichtliche Visualisierung und Bewertung des aktuellen Standes der Baustelle. Dazu werden

Kategorien wie Termine, Qualität, Ordnung, Sauberkeit, Arbeitssicherheit und Logistik mittels einer leicht erfassbaren Ampelsystematik dargestellt. Diese Darstellung erfolgt auf Taktsteuerungstafeln (TSTn). [Verein deutscher Ingenieure, 2019, S. 83]

Wesentlich für den Erfolg der Taktsteuerung ist die Integration des gesamten Projektteams. Dies wird zum einen durch die Taktsteuerungstafeln erreicht, da diese sowohl in den Baucontainern, als auch auf der Baustelle verteilt aufgestellt werden. So können alle – von dem Baustellenmanagement bis zu den ausführenden Arbeitskräften – direkt am Ort der Wertschöpfung auf dieselben Informationen zugreifen [Verein deutscher Ingenieure, 2019, S. 83]. Zum anderen wird eine gemeinschaftliche, kooperative Arbeitsweise dadurch gefördert, dass regelmäßig Besprechungen an den Taktsteuerungstafeln abgehalten werden.

Besprechungen

Kernelemente zur Umsetzung der Taktsteuerung stellen die täglichen und wöchentlichen Besprechungen dar¹⁰.

Tägliche Besprechung: Tägliche Besprechungen stellen ein Werkzeug zur Einhaltung des aktuellen Taktes dar. Dieser steht im Fokus und gibt somit den Betrachtungszeitraum vor – bspw. die Arbeitswoche von Montag bis Freitag. An den täglichen, kurzen, i. d. R. wenige Minuten dauernden Besprechungen nehmen die Bauleitung, Poliere und Vorarbeiter aller an den aktuellen Arbeiten beteiligten Unternehmen und Gewerke sowie ggf. die Projektleitung teil. Sie bilden die Basis zur Überwachung und Steuerung des Bauablaufes und werden von der Bauleitung moderiert. Es findet ein gemeinsamer, gewerkweiser Soll-Ist-Vergleich des Baustellenstandes aufbauend auf dem Taktplan und den auf den Taktsteuerungstafeln dargestellten Informationen sowie die Bewertung der zuvor genannten Kategorien gemäß der Ampelsystematik statt [Verein deutscher Ingenieure, 2019, S. 83]. Die Bewertungen werden direkt an den Taktsteuerungstafeln erfasst. Bestehen Abweichungen zum Soll-Zustand, werden Maßnahmen zur Behebung vereinbart und ebenfalls auf den Taktsteuerungstafeln festgehalten und nachverfolgt.

Wöchentliche Besprechungen: Neben den täglichen Besprechungen müssen vorlaufend die Arbeitsinhalte, Herstellungsprozesse, ablaufbedingte, kapazitative und technologische Abhängigkeiten im Bauablauf, benötigte Ressourcen und die Baustellenversorgung der kommenden Wochen koordiniert werden. Dazu können in einer niedrigeren Frequenz – üblicherweise jede oder jede zweite Woche – Besprechungen durchgeführt werden. An diesen Besprechungen nehmen Projekt- und Bauleitung der beteiligten Unternehmen teil.

¹⁰ Im Weiteren werden mit diesen Besprechungen neben deren eigentlicher Durchführung auch die Prozesse der Vor- sowie Nachbereitung verbunden, auch wenn dies nicht explizit erwähnt wird.

2.5.3 Taktsteuerungstafeln

Als Steuerungswerkzeug getakteter Baustellen bilden Taktsteuerungstafeln die zentrale Informationsbasis für die täglichen und wöchentlichen Taktbesprechungen. Auf ihnen werden der aktuelle Stand der Baustelle sowie weiterführende Informationen transparent und übersichtlich visualisiert. Sie stellen darüber hinaus Informationen zur Durchführung der Herstellungsprozesse für die ausführenden Gewerke bereit. Sie sollten direkt am Ort der Wertschöpfung, also in den jeweiligen Bauabschnitten auf der Baustelle, gut sichtbar positioniert werden. Alle Projektbeteiligten von den ausführenden Arbeitskräften bis hin zur Projektleitung haben so die Möglichkeit, die für sie relevanten Informationen einzusehen.

Bestandteile und Aufbau

Aufgrund individueller Projektrandbedingungen und -konstellationen sind Taktsteuerungstafeln nicht standardisiert und können sich zwischen Unternehmen und von Projekt zu Projekt in Struktur und Umfang unterscheiden. Ihre wesentlichen Bestandteile ähneln sich jedoch oft und werden zumeist in Kategorien gegliedert. Sie visualisieren Informationen aus verschiedenen Bereichen [Verein deutscher Ingenieure, 2019, S. 84]. Ein Beispiel einer realen Taktsteuerungstafel ist in Abbildung 2-5 dargestellt. In [Binninger u. Wolfbeiß, 2018b, S. 169] wird eine Übersicht üblicher Inhalte gegeben:

- „Statusbewertung für Qualität, Termin und Ordnung
- Informationen zu Ansprechpartnern
- Informationen zu positiven Qualitätspunkten
- Termine: Terminplan und Zwei-Wochen-Vorschau,
- Bauablauf: Visualisierung der Baustelle mit einzelnen Taktbereichen,
- Informationen: allgemeine Informationen wie Baustellenregeln und Ansprechpartner,
- Bewertung und Maßnahme: Ampelbewertungen zu Qualität/Termin und Ordnung/ Sauberkeit/Arbeitssicherheit sowie abgeleiteten Maßnahmen,
- Arbeitsschritte/Bemusterung: ausführliche Auflistung der Arbeitspakete und Arbeitsschritte sowie ein Bemusterungsbogen für Sonderwünsche,
- Qualität: Bilder, die sowohl gute als auch schlechte Beispiele zeigen“

Ampelbewertung

Auf Taktsteuerungstafeln erfolgt die Bewertung von Arbeitsleistungen (Termintreue, Qualität), Ordnung, Sauberkeit, Arbeitssicherheit und Logistik gemäß der aus dem Toyota Produktions-

system stammenden und in das visuelle Management einzuordnenden Andon-Methode. Dabei werden die Bewertungen auf drei Stufen abstrahiert und wie in Abbildung 2-4 entsprechend einer Ampel dargestellt. Diese Darstellungsform erlaubt eine intuitive, sofortige und leicht verständliche Einordnung des Baustellenstandes.



Abbildung 2-4: Schematische Darstellung der Ampelsystematik (Eigene Darstellung)

Werden Kategorien in den täglichen Taktbesprechungen als taktkritisch oder sehr taktkritisch bewertet, so werden direkt Gegenmaßnahmen definiert. In der oder den nächsten Besprechung(en) wird dann nachverfolgt, ob sich der Zustand geändert hat. Diese Methode unterstützt das Ziel einer fließenden, störungsfreien Abfolge der Gewerke mit Übergabe des Taktabschnitts an das nächste Gewerk mit dem Ende eines Taktes. [Verein deutscher Ingenieure, 2019, S. 84]



Abbildung 2-5: Darstellung einer realen Taktsteuerungstafel aus [Verein deutscher Ingenieure, 2019, S. 85]

3 Taktplanung und Taktsteuerung im Kontext der digitalen Transformation im Bauwesen

In diesem Kapitel wird beschrieben, dass die Nutzung digitaler Methoden und die Einführung neuer¹ Denk- und Arbeitsweisen im Bauwesen große Chancen bieten, aktuellen Herausforderungen zu begegnen und welche Hindernisse dabei derzeit bestehen. Im Anschluss daran wird der Stand von Forschung und Praxis auf diesem Gebiet aufgezeigt, sowie der für diese Arbeit relevante Forschungsbedarf in der Taktplanung und -steuerung herausgestellt. Das Kapitel schließen eine Anforderungsanalyse als Grundlage für das Konzept einer digital unterstützten Taktsteuerung sowie eine Abgrenzung zu bestehenden Softwarelösungen ab.

3.1 Herausforderungen und Chancen in der Baubranche

Die Auftragslage in der Baubranche ist seit mehreren Jahren in vielen Bereichen, wie dem Hoch- oder Wohnungsbau, sehr gut: „Deutsche Bauindustrie boomt weiter [...]“ [Torka, 2018] [ZEIT ONLINE, 2019; Destatis, 2019d,a]. Die allgemein gute wirtschaftliche Lage und günstige finanzielle Rahmenbedingungen, wie niedrige Zinsen, fördern Investitionen. Trotz leichten Rückgangs des Wirtschaftswachstums in Deutschland Anfang 2019 ist im Baugewerbe ein Anstieg der Bruttowertschöpfung um 4,4% zu verzeichnen [Destatis, 2019b]. Laut Prognosen soll dieser Trend anhalten, die Wachstumsentwicklung wird weiterhin positiv bewertet [Bundesvereinigung Bauwirtschaft, 2019; Fuest, 2019]; es wird für das Jahr 2019 ein Anstieg „des nominale[n] Wachstum[s] der baugewerblichen Umsätze im Bauhauptgewerbe von [...] 8,5%“ prognostiziert [Hübner, 2019].

Aufgrund dieser Ausgangslage scheint kein akuter Zwang zu größeren Veränderungen für Unternehmen sowie in der Projektabwicklung gegeben zu sein. Bei steigenden Auftragsvolumen sind viele Firmen jedoch an ihre Kapazitätsgrenzen gestoßen, sodass potentielle Aufträge nicht angenommen und zur Ausführung gebracht werden können. Ein wesentlicher Grund dafür liegt in dem Arbeitskräftemangel in Deutschland durch den Rückgang der Erwerbstätigkeit und dem damit verbundenen Fachkräftemangel [Winkeljohann u. a., 2014, S. 18]. Zudem resultiert daraus eine hohe Arbeitsbelastung für alle Beschäftigten.

¹ Als „neue“ Denk- oder Arbeitsweisen werden in dieser Arbeit solche Ansätze verstanden, die bisher wenig Anwendung und Verbreitung im Bauwesen gefunden haben und somit „neu“ eingeführt werden.

Um fehlende Arbeitskraft auszugleichen oder bei gleichbleibender Arbeitskraft das Personal zu entlasten, müssen die vorhandenen Ressourcen zur Steigerung der Produktivität effizienter eingesetzt werden [Stern u. a., 2018, S. 8]. Produktivitätssteigerungen können durch Effizienzsteigerungen (Steigerung der Produktionsmenge bei gleichbleibender Arbeitszeit, Reduktion der Arbeitszeit bei gleichbleibender Produktionsmenge oder Kombination beider Ansätze), „technologischen Fortschritt oder durch Einführung bahnbrechender Innovationen“ [EANPC, 2005, S. 13] erreicht werden (vgl. 2.1.1). Wie in [van Ark u. de Jong, 2004, S. 20,21] bzw. darauf aufbauend in [EANPC, 2005, S. 12,13] beschrieben, steht die Produktivität überdies in direktem Zusammenhang mit der Wertschöpfung: Wird die Produktivität gesteigert, so kann dadurch auch die Wertschöpfung gesteigert werden [EANPC, 2005, S. 12,13].

In diesem Zusammenhang stellt die digitale Transformation eine der aktuell größten Herausforderungen für die Baubranche dar, die – auch bedingt durch die gute wirtschaftliche Lage und den dadurch geringen Innovationsdruck – von den Unternehmen nur zögerlich vollzogen wird: „Deutsche Bauindustrie boomt weiter – und droht den digitalen Anschluss zu verpassen“ [Torka, 2018]. [Stern u. a., 2018, S. 12,13]

Produktivitätssteigerungspotentiale durch Anwendung neuer Ansätze

Die Produktivitätssteigerungsraten im Bauhauptgewerbe für die Jahre 2019, 2020 und darüber hinaus werden je nach Einrichtung und Wirtschaftszweig (Infrastruktur, Hochbau, Wohnungsbau etc.) unterschiedlich hoch eingeschätzt (s. folgende Absätze). Als Grundlage für einen nachhaltigen und anhaltenden Produktivitätszuwachs in der Zukunft wird die Annahme von bzw. Forderung nach einem schnelleren und stärkeren Einsatz digitaler Methoden und Technologien im Rahmen der digitalen Transformation, stärkerer Standardisierung² sowie neuer Arbeitsweisen und -methoden gesehen. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf der BIM-Methodik und der LC. Neben den Effizienz- und Produktivitätssteigerungen kann deren Einführung als eine Gelegenheit genutzt werden, das kollaborative, gemeinschaftliche Arbeiten und die daran beteiligten Menschen in den Fokus der Baubranche zu rücken: „Es geht nicht nur um Effizienzsteigerung und Kostensenkung, sondern auch um Menschlichkeit.“ [Allplan, 2017]. [Agarwal u. a., 2016; Sommer, 2016; Kröger, 2018; Moring u. a., 2018; Allplan, 2017]

In [Stern u. a., 2018, S. 5] werden Lean Construction und digitale Methoden als zwei Ansätze zur Produktivitätssteigerung im Infrastruktur- und Wohnungsbau bezeichnet: „Politik und Bauindustrie können gemeinsam die Produktivität in Infrastrukturprojekten um 30 bis 40% erhöhen und so die politischen Ziele erreichen“ [Stern u. a., 2018, S. 14].

Eine Befragung von „100 führenden Unternehmen der deutschen Bauwirtschaft“ [Niederdrenk u. Seemann, 2018, S. 5] durch PricewaterhouseCoopers Deutschland ergab: „Durch BIM erwar-

² Hiermit sind insb. Prozesse und nicht vorrangig die Bauwerksarchitektur gemeint.

ten die befragten Unternehmen bis 2020 ein Zusatzwachstum von bis zu 3 Prozentpunkten p. a. Dies ist hauptsächlich auf die Effizienzsteigerung zurückzuführen, die mit dem Einsatz von BIM verbunden ist.“ [Niederdrenk u. Seemann, 2018, S. 21]

Auch seitens der deutschen Bundesregierung wird mit der Anwendung der BIM-Methodik eine Effizienzsteigerung verbunden: „Das Kompetenzzentrum [BIM-Kompetenzzentrum für die Bundesbauverwaltungen beim Amt für Bundesbau in Rheinland-Pfalz – Anmerkung des Verfassers] dient der beschleunigten Einführung digitaler Methoden und der damit einhergehenden Effizienzsteigerung in der Bauwirtschaft.“ [Bundesregierung der Bundesrepublik Deutschland, 2018, S. 10]

In [BMVI, 2015] wird neben der Beschreibung der BIM-Methodik auch deutlich gemacht, dass zu deren Anwendung kooperatives, gemeinschaftliches Arbeiten, neue Denkweisen und neue Prozesse benötigt werden [BMVI, 2015, S. 4,10].

Auch in [Rambach, 2019, S. 4] wird konstatiert, dass als Resultat des Arbeitens mit digitalen Werkzeugen unter Einhaltung definierter Regeln im Kontext der BIM-Methodik eine echte Kolaboration zwischen den Projektbeteiligten entstehen könne. Diese führe „wiederum zu messbar mehr Effektivität und Effizienz von Planungs- und Produktionsprozessen“ [Rambach, 2019, S. 4].

Notwendigkeit und Chancen durch die digitale Transformation

In den 1960er Jahren wurde erstmals computergestützte Systeme im Ingenieurbereich eingesetzt [Nemetschek]. In vielen Aufgabenbereichen fand seitdem eine Überführung analoger Arbeiten auf den Computer statt. In den 1980er Jahren wurde das Zeichnen von zwei- und später dreidimensionalen Bauwerksplänen und -ansichten in digitalen Computer Aided Design (CAD)-Umgebungen populär [Nemetschek; InfoWorld, 1984]. Die dazugehörigen Arbeitsabläufe änderten sich hingegen nur marginal: Anstatt Striche auf Zeichenbrettern mit Feder und Tusche zu zeichnen, wurde ein digitales, geometrisches Abbild ohne weiterführende Semantik erstellt. Alle anderen Abläufe im Umgang mit den so erstellten Strichzeichnungen blieben nahezu unverändert. Aufgrund der fehlenden Semantik konnten Softwareanwendungen zur Erstellung und Bearbeitung, nicht oder nur eingeschränkt zur Interpretation der Informationen genutzt werden. Dasselbe galt in anderen Bereichen, wie z. B. computergestützten Berechnungen im Computer Aided Engineering (CAE) oder dem Umgang mit Wissen, das zusammenhanglos und unvernetzt in digitalen (Text-)Dokumenten hinterlegt wurde. [Borrman u. a., 2015, S. 2]

Das volle Potential digitaler Arbeitsweisen und Werkzeuge – sowohl hardware- als auch softwareseitig – kann nur dann ausgeschöpft werden, wenn Abläufe nicht unverändert digitalisiert, also von analog zu digital „übersetzt“ werden, sondern im Rahmen der digitalen Transformation unter Nutzung der neuen technologischen Möglichkeiten restrukturiert und auf untereinander

vernetztem Wissen aufgebaut werden. Analog zur Lean-Denkweise sollten ausgehend von dem Ziel, also dem Ergebnis des betrachteten Prozesses, neue Wege zur Zielerreichung gefunden und die dazu notwendigen Werkzeuge zielführend eingesetzt oder neu geschaffen werden. Dies umfasst im Bauwesen nicht nur die Herstellungsprozesse, sondern Prozesse aller Geschäftsbereiche auf allen Unternehmens- und Projektebenen. Die damit einhergehenden Veränderungen bedingen auch die technische Einarbeitung aller Mitarbeitenden (vgl. [Till Alexander Leopold u. a., 2018, S. 22,23]) und setzen deren Aufgeschlossenheit gegenüber Neuem sowie einen Wandel hin zu einem kollaborativen Denken voraus [Agarwal u. a., 2016]. [Dürr, 2018]

BIM-Methodik als Katalysator der digitalen Transformation

Einen Katalysator für die digitale Transformation stellt die Einführung und Anwendung der Methodik des Building Information Modelings dar. Dieser Arbeitsweise wird nicht nur in der Forschung, sondern auch seit einigen Jahren zunehmend in der Praxis Aufmerksamkeit geschenkt. In ihrem Zentrum steht das kollaborative Arbeiten mit digitalen Abbildern der herzustellenden Bauwerke. Durch die Verknüpfung semantischer und geometrischer Informationen mit weiteren Informationsbereichen, wie Prozessen, Terminen, Logistik oder Kosten, ergeben sich vielfältige Möglichkeiten, neue und kollaborativ geprägte Prozesse zu etablieren. Eine Anwendung der BIM-Methodik kann ohne Mehrkosten zu verursachen zu Transparenz und damit zu höheren Qualitäten in den Planungsprozessen führen. Auch während der Bauphase können Aufwände im Projektmanagement reduziert und somit die Projektleitung entlastet werden [Bundesregierung der Bundesrepublik Deutschland, 2018, S. 4]. Aufgrund der vielfältigen Abläufe und komplexen Beziehungsgeflechte der Beteiligten bietet der Bereich des Projektmanagements während der Ausführungsphase darüber hinaus großes Potential zur Optimierung von Abläufen und zur Förderung eines besseren Arbeitsklimas.

Herausforderungen bei der Einführung und Anwendung von BIM-Methodik und Lean Construction

Im internationalen Vergleich liegt Deutschland bei der Einführung von Ansätzen, wie der Lean Construction oder der BIM-Methodik noch hinter anderen Nationen zurück [Fiedler, 2018a, S. XV], [André Borrmann u. a., 2018, S. 41-43]. Die Gründe dafür sind vielfältig. Wesentlich sind vor allem die stark fragmentierten Wertschöpfungs- und Prozessketten sowie eine heterogene Unternehmenslandschaft mit vielen kleinen und mittelständischen Unternehmen. Die Vergabe von Projekten gliedert sich meist in mehrere Stufen, bei denen Aufträge für Planungs- und Ausführungsphasen getrennt voneinander vergeben und von unterschiedlichen Unternehmen durchgeführt werden [André Borrmann u. a., 2018, 49]. Die Vorteile einer integralen Projektabwicklung können dadurch nicht voll ausgeschöpft werden. Auch die gängigen Geschäftsmodelle stehen zum Teil im Widerspruch zu auf Kooperation und Kollaboration basierenden gemein-

schaftlichen Arbeitsweisen, wie es BIM und LC sind. Sie basieren auf der Ausnutzung von Fehlern bei Ausschreibungen und Angeboten, aggressivem Claim- und Anti-Claim Management.

Nach [André Borrman u. a., 2018, 49-53] bestehen weitere Hemmnisse in der unzureichend geregelten Vergütung digital durchgeföhrter Planungsleistungen in der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI)³, mangelhaft definierten normativen und verfahrenstechnischen Rahmenbedingungen sowie mangelndem Antrieb der Auftraggeber, eine digitale, BIM-basierte Projektabwicklung zu fordern und fördern.

Unikatcharakter, Standardisierung und Fokussierung auf Bauwerk und Prozesse

Das herzustellende Bauwerk stellt den zu schaffenden (Kunden-)Wert dar und steht im Mittelpunkt eines Bauprojektes. Alle Prozesse sollten daher auf seine Herstellung ausgerichtet werden. Diese Sicht spiegelt sich in den Arbeitsweisen der BIM-Methodik und der LC wider, die einen starken Bauwerksbezug besitzen.

Ein wesentlicher Unterschied der stationären zur Baustellenproduktion ist der Charakter der Produkte. Werden in der Serien- oder Massenproduktion große Stückzahlen desselben Produktes gefertigt, so stellen Bauwerke hingegen stets Unikate dar. Diese Sichtweise wird in der Baupraxis häufig als Rechtfertigung für die Komplexität und Unvorhersehbarkeit in Bauprojekten und als Ursache langer Bauzeiten, mangelhafter Qualität oder großen Kostenänderungen genannt. Auch dient sie als Begründung dafür, dass eine Einföhrung von Ansätzen aus der stationären Industrie, wie etwa LC, nicht möglich sei. Jedoch wird sie nicht ausreichend differenziert ausgelegt. Denn für die Anwendung vieler Lean-Aspekte sind vor allem die dahinterliegenden Prozesse entscheidend. Diese laufen oft gleich oder sehr ähnlich ab und sind somit in vielen Fällen standardisierbar. Für viele Bauteile haben sich Bauverfahren etabliert, deren Abläufe detailliert bekannt sind. Gerade bei Standardbauteilen sind es häufig nur einzelne Faktoren, wie die Abmaße oder Baustoffe, die sich ändern. Die eigentlichen Planungs- und Herstellungsprozesse hingegen bleiben gleich. Modelle solcher Bauteile werden in digitalen Bauteilbibliotheken – firmenintern oder durch Dienstleister (vgl. z. B. [BIMobject, 2019]) – mit ihren geometrischen und semantischen Informationen bereitgestellt. Auch Richtzeichnungen für Ingenieurbauten (RiZ-ING) [Bundesanstalt für Straßenwesen, 2017] dienen als standardisierte Vorlagen. Für sich wiederholende Tätigkeiten existieren zudem Aufwandswerte, die verdeutlichen, dass auch die Aufwandsbemessung planbar ist [Zentralverband des Deutschen Baugewerbes e.V., 2013; Institut für Zeitwirtschaft und Betriebsberatung Bau]. Analysen der Tätigkeiten auf Baustellen, z. B. mit Hilfe der Einordnung in Arbeitssysteme (vgl. [DIN EN ISO

³ Anmerkung d. Autors: Am 04.07.2019 wurde vom Europäischen Gerichtshof mit dem Urteil in der Rechtssache C-377/17 festgestellt, dass die Verbindlichkeit der Mindest- und Höchstsätze der HOAI nicht mit EU-Recht vereinbar ist. Die Auswirkungen dieses Urteils hinsichtlich der Vergütung von BIM-Leistungen können zum Zeitpunkt der Einreichung dieser Dissertation noch nicht abgesehen werden. <http://curia.europa.eu/juris/liste.jsf?language=de&td=ALL&num=C-377/17>, Zugriff: 02.08.2019

6385:2016, 2016; REFA-Consulting AG, b]), ermöglichen darüber hinaus sehr detaillierte Aussagen über die Durchführung der Herstellungsprozesse bis in eine hohe Detaillierungsebene.

Diese Informationsquellen liefern somit vorab bereits eine breite Basis zur Planung der Prozesse. Werden die Herstellungsprozesse überdies digital erfasst und über digitale Bauwerksmodelle mit den Bauwerken verknüpft, so ermöglicht dies zum einen eine detaillierte und in Teilen automatisierbare Planung der Ausführung, bspw. im Rahmen der Taktplanung (s. 5.4). Zum anderen wird eine feingliedrige Prozesssteuerung während der Ausführungsphase und damit die Anwendung prozessorientierter Arbeitsweisen, wie der Taktsteuerung, und dazugehöriger Werkzeuge unterstützt.

Gemeinschaftliches Arbeiten

Eine Steigerung der Produktivität kann nicht ausschließlich durch die Anwendung neuer Arbeitsweisen, Prozessanpassungen und digitale Technologien erreicht werden. Vielmehr erfordert dies auch ein Umdenken in den Köpfen der Beteiligten. Soll verstärkt kollaborativ, kooperativ und gemeinschaftlich gearbeitet werden, so ist ein Umdenken über alle Projektphasen und alle Unternehmensebenen hinweg erforderlich [Hübner u. Müller, 2018, S. 6-11]. Die beteiligten Menschen sollten dabei aufgeschlossen gegenüber Neuem sein und langfristig bleiben. Dies umfasst die Akzeptanz neuer Arbeitsweisen, wie BIM oder LC, sowie auf übergeordneter Ebene das Umdenken in der Zusammenarbeit zwischen Bauherren, Auftraggebern und Auftragnehmern. Dazu kann das Etablieren einer Kultur des gemeinsam Arbeiten Wollens, die sich von der Akzeptanz für neue, kooperative Vergütungs-, Vertrags- und Geschäftsmodelle bis hin zur Ausführung auf der Baustelle (bspw. technische Probleme vor Ort möglichst schnell und gemeinsam lösen wollen) erstrecken, beitragen.

3.2 Stand der Wissenschaft und Praxis

In diesem Abschnitt werden wissenschaftliche Arbeiten vorgestellt, die sich mit der Verknüpfung und gemeinsamen Anwendung der BIM-Methodik und einer digital unterstützten LC befassen. Im Anschluss daran werden bereits in der Baupraxis eingesetzte Softwarelösungen in diesem Kontext vorgestellt. Anhand dieser Analyse wird verdeutlicht, dass auf dem Gebiet der digitalen, BIM-basierten Unterstützung und Anwendung der LC und im Speziellen der Taktplanung und -steuerung großer Forschungsbedarf besteht.

3.2.1 Wissenschaftliche Einordnung

Nachfolgend werden wissenschaftliche Veröffentlichungen aus dem Themengebiet der Verknüpfung der BIM-Methodik mit LC-Ansätzen mit Fokus auf die Bauausführung sowie konkret die Taktplanung und -steuerung betreffende Forschungsarbeiten vorgestellt. Im Anschluss wird eine Übersicht weiterführender Arbeiten auf diesem Gebiet gegeben.

Verknüpfung und Synergien zwischen LC und BIM

[Sacks u. a., 2010] stellt eine grundlegende Arbeit auf dem Forschungsgebiet dar. Auf eine Zusammenfassung der Entwicklungen, die zu der Zusammenführung der beiden Arbeitsweisen führten, folgt eine Vorstellung der in Verbindung mit der Anwendung der BIM-Methodik relevanten LC-Prinzipien. Es werden 24 in die Kategorien Flussprozesse, Wertschöpfungsprozesse, Problemlösung und Entwicklung von Partnerschaften eingeteilte Prinzipien, wie die Reduzierung von Varianzen, Standardisierung, visuelles Management etc., vorgestellt. Im Anschluss daran werden die Schlüsselaspekte der BIM-Methodik selbst (Visualisierung, einfacher Entwurf mehrerer Design-Varianten, Nutzung der Modelldaten, Unterstützung der Kollaboration bei Planung und Bau u. v. m.) beschrieben. Auf dieser Basis stellen die Autoren dann in einer umfassenden Matrix diese beiden Bereiche gegenüber und schildern insgesamt 56 sowohl positive als auch negative Wechselwirkungen mit teils weiterführender Literatur. Als Punkte mit den meisten Interaktionen werden aus dem Bereich der LC Reduktion von Varianzen bei den Qualitäten der zu verbauenden Produkte sowie in den Produktionsprozessen und die Verringerung der Durchlaufzeiten genannt. Aus dem Bereich der BIM-Anwendung werden die Auswertungsmöglichkeiten der Form und Funktionalität, die Zusammenführung interdisziplinärer Modelle, die „4D“-Visualisierung der Ablaufplanung sowie die Online-Kommunikation von Produkt- und Prozessinformationen herausgestellt.

Aufbauend auf [Sacks u. a., 2010] wird in [Sacks u. a., 2013] das Workflow System „KanBIM“ beschrieben, welches die kurzzyklische Prozessplanung und -überwachung mithilfe einer übersichtlichen Visualisierung der geplanten und laufender Arbeiten ermöglicht. Es basiert auf der aus dem Toyota Produktionssystem stammenden Kanban-Methode, bei der mithilfe von Karten eine auf dem Ziehprinzip basierende Produktionsplanung, -überwachung und -steuerung durchgeführt wird. Das System wurde prototypisch als Windows Desktopanwendung unter Nutzung des Autodesk Navisworks Viewers erstellt. Im Zentrum der Darstellung befindet sich das digitale Bauwerksmodell. Das System ermöglicht eine multilinguale Darstellung, um es allen an der Ausführung beteiligten Personen zugänglich zu machen. Es wurde in drei Testphasen in realen Projekten evaluiert. Die Anwendung des Systems konnte demnach zu einigen Verbesserungen in den Bauabläufen führen. In [Gurevich u. Sacks, 2014] beschreiben die Autoren eine tiefergehende Analyse des Systems am Beispiel von Nachunternehmern im Innenausbau. Dabei wurde in einer virtuellen Umgebung (Cave) untersucht, wie die Entscheidungen zur Auswahl der durchzuführenden Vorgänge der Bauleiter von Nachunternehmern mit und ohne Anwendung des Systems ausfällt. Durch die Nutzung von KanBIM wurde demnach erreicht, dass die Anwender sich stärker an den LC-Prinzipien orientierten, selbst wenn sie sich dessen nicht bewusst waren. Als abschließendes Ergebnis der Studie wird festgehalten, dass Systeme wie KanBIM zu einer Verbesserung der Arbeitsabläufe und einer Wertschöpfungssteigerung von bis zu 38 Prozent führen könnten.

Digital unterstützte, LC-basierte Bauprozesssteuerung

In [von Heyl u. Teizer, 2017] wird ein Ansatz zur digitalen Unterstützung der LC-Methoden Last Planner System® sowie Taktplanung und -steuerung vorgestellt. Es wird herausgestellt, dass beide Methoden darauf abzielen, einen stetigen Produktionsfluss zu erzielen und durch ständige Visualisierung der auszuführenden Aufgaben, Prozesse und Abhängigkeiten das Projektverständnis zu verbessern [von Heyl u. Teizer, 2017, S. 3]. Sie basieren auf einer kontinuierlichen Überwachung der Herstellungsprozesse und erfordern ein funktionierendes Informations- und Kommunikationsmanagement [von Heyl u. Teizer, 2017, S. 3]. Die Wichtigkeit des Informationsmanagements wird im Weiteren beschrieben und als Schlüssel zur erfolgreichen Anwendung der genannten Methoden identifiziert. Als wichtigste Datentypen werden gemäß [Berner u. a., 2015, S. 58-60] geplante (Soll-), aktuelle (Ist-) sowie (Plan-) Zieldaten genannt. Diese müssen regelmäßig erhoben werden und dienen als Grundlage für den in Form eines kybernetischen Regelkreises ablaufenden Steuerungsprozess von Planung, Soll-Ist-Vergleich, Abweichungsanalyse und Festlegung von Maßnahmen [Berner u. a., 2015, S. 56-57]. Der Schwerpunkt der Untersuchungen in [von Heyl u. Teizer, 2017] liegt darauf, durch das automatische Erfassen und Verfolgen (Tracking und Reporting) von Ist-Daten die Bauleitung bei der Baustellensteuerung zu entlasten. Durch die permanente und hochauflösende Datenerfassung wird darüber hinaus die Prozessqualität erhöht. Es wird aufgezeigt, wie dies durch die Anpassung der Prozesse und den Einsatz digitaler Technologien erreicht werden kann. Dazu wird ein Konzept vorgestellt, das auf einer auf drahtloser Ortung mittels Bluetooth Low Energy Sensoren aufbauenden Internet of Things (IoT)-Plattform und dem Einsatz mobiler Geräte basiert. Dieses System wird mit einer BIM-Anwendung gekoppelt, um die erfassten IoT-Daten – beispielhaft werden im Gebäudeinneren Positionen von Personen bestimmt – mit Bauwerksdaten zu verknüpfen.

Auch am Center for Integrated Facility Engineering der Stanford University wurde ein Ansatz entwickelt, der der Bauleitung bei den zyklischen Steuerungsprozessen (engl. *feedback loops*) der Baustelle helfen soll [Fischer u. Schuetz, 2017]. Durch die Auswertung vergangener Projektdaten mittels maschinellen Lernens soll die Bauleitung in künftigen Projekten bei der Auswahl von und Fokussierung auf die richtigen Schwerpunkte der richtigen Vorgänge zu den richtigen Zeitpunkten unterstützt werden. Um dies zu ermöglichen, wurde ein Software-Tool entwickelt, das der Aufnahme der dazu benötigten Daten dient. Das Ziel der Forschungen ist es, die LC-basierte kurzzyklische Produktionsplanung durch die Verknüpfung von Prozessdaten und Ressourcen mit BIM-Modellen zu verbessern. Eine prototypische Umsetzung, die auf der cloud-basierten Plattform Autodesk Forge basiert, zeigt, dass es möglich ist, mittels eines Algorithmus Taktabschnitte in digitalen Bauwerksmodellen automatisiert zu erkennen, Taktpläne daraus abzuleiten und diese wiederum mit den Bauwerksmodellen zu verknüpfen. Auf dieser Datenbasis aufbauend werden Empfehlungen hinsichtlich der zu priorisierenden Aufga-

ben an die Anwender gegeben. Die Evaluierung in drei realen Bauprojekten hat gezeigt, dass die Planungsbesprechungen um 58 Prozent⁴ effizienter durchgeführt werden konnten.

Weitere Veröffentlichungen

Weitere Veröffentlichungen und wissenschaftliche Arbeiten zu Verknüpfungen, Überschneidungen und Synergien zwischen LC und BIM sind u. a.:

- [Gerber u. a., 2010]: Untersuchung von Überschneidungen zwischen LC und BIM anhand dreier Fallbeispiele in Form realer Bauprojekte mit dem Ergebnis, dass in allen drei Fällen durch die gemeinsame Anwendung Verschwendungsreduzierungen (Zeit, Kosten, Material) und Wertsteigerungen für den Kunden erreicht werden konnten.
- [Arayici u. a., 2011]: Untersuchung des Einsatzes von BIM-Technologien zur Effizienz- und Produktivitätssteigerung mit dem Ergebnis, dass eine bottom-up Einführung des BIM-Ansatzes zu einer höheren Akzeptanz als eine top-down Herangehensweise führt und so zu Wertschöpfungssteigerungen und der Reduktion von Verschwendungen führen kann.
- [Oskouie u. a., 2012]: Auf [Sacks u. a., 2010] aufbauende Untersuchung von Interaktionen zwischen LC und BIM anhand wissenschaftlicher und Industrieprojekte.
- [Fosse u. a., 2017]: Auf [Khanzode u. a., 2006] aufbauende Untersuchung des durch den gemeinsamen Einsatz von LC und BIM in der Praxis erreichbaren Mehrwerts für Projekte sowie wichtiger unterstützender Faktoren und möglicher Hemmnisse dabei.
- [Sacks u. a., 2018]: Detaillierte Schilderungen zu der Einführung von LC und BIM in einem israelischen Unternehmen mit 700 Angestellten, den dabei entstandenen Interaktionen und Synergien sowie aufgetretener Probleme. Darüber hinaus werden Erfahrungen weiterer auf diesem Gebiet führender Unternehmen beschrieben.
- [Lin u. Golparvar-Fard, 2018]: Vorstellung eines BIM-basierten Softwaresystems, das auf der visuellen Analyse und Darstellung von Plan- und Ist-Daten basiert. Aus Foto-, Video- und Punktwolkendaten wird ein 4D-Ist-Modell mit einem 4D-Soll-Modell überlagert, so dass ein „4D Visual Production Model“ als Grundlage zur Arbeitsplanung dienen kann. Die Validierung des Systems erfolgte in mehreren realen Bauprojekten und zeigte, dass durch visuelle Schnittstellen zwischen Menschen und Informationen Prozesse transparenter dargestellt werden können, sodass eine höhere Prozessstabilität erreicht und Personal- sowie Logistikplanung verbessert werden können.

⁴ Durchschnittlich dauerten die Besprechungen ohne das Tool 5h 30min, mit Anwendung des Prototypen 2h 20min.

- [Saieg u. a., 2018]: Betrachtung des Aspekts der Nachhaltigkeit in Kombination mit LC und BIM. Interaktionen dieser drei Bereiche werden umfassend analysiert. Die Ergebnisse der Analyse werden in einer sog. „BIM, Lean and Green integration matrix“ dargestellt.

3.2.2 Digitalisierungsansätze von Methoden und Werkzeugen der Lean Construction in der Baupraxis

Im Gegensatz zu anderen Branchen ist die Wertschöpfungskette im Bauwesen stark fragmentiert. Die komplex voneinander abhängigen wertschöpfenden Tätigkeiten werden von einer Vielzahl spezialisierter Beteiligter ausgeführt. Die von diesen eingesetzten kommerziellen Softwaresysteme basieren zumeist auf proprietären Datenformaten. So ist eine heterogene Softwarelandschaft entstanden, in der keine ganzheitlichen, alle Prozesse abdeckenden Standards und Softwarelösungen etabliert sind. Mit der Einführung der BIM-Methodik wurden zwar Schritte zur Schaffung eines Bewusstseins der Notwendigkeit der Anwendung digitaler Methoden und Werkzeuge in der Praxis gemacht. Auch ist es mittels des offenen Industry Foundation Classes (IFC) Standards möglich, Teile der bauwerksbezogenen Daten untereinander auszutauschen. Eine vollständige, LC- und BIM-basierte und durch den Einsatz digitaler Technologien unterstützte Arbeitsweise ist bislang aber nicht möglich. [Oprach u. a., 2018]

Digitale Projektplattformen

In [Kröger, 2018, S. 73-74] wird die Notwendigkeit virtueller Kollaboration auf Basis digitaler, webbasierter Projektplattformen zur Verbesserung der Zusammenarbeit beschrieben. Beispielsweise wird eine zentrale Informationsplattform mit Dokumentenmanagement und der Möglichkeit zum Versenden von Nachrichten als Ansatz zur Förderung der Agilität in Teams und einer vereinfachten Dokumentation genannt. Als weiterer Bestandteil einer solchen Plattform wird die Erfassung und Überwachung von Arbeitsabläufen mit einer Visualisierung über digitale Boards beschrieben. Werden Bauwerksinformationen digital erfasst und mit anderen Informationen, wie dem aktuellen Baustellenstatus, verknüpft, so ermöglichen solche Plattformen die „modellbasierte Fortschrittskontrolle, Abnahmedokumentation oder Qualitätssicherung“ [Kröger, 2018, S. 74].

Beispiele für Implementierungen

In der Bauwirtschaft wurden erste Ansätze zur digitalen Unterstützung LC-basierter Arbeitsweisen implementiert, die über den Einsatz von Standardsoftware, wie Tabellenkalkulations- oder Terminplanungssoftware, hinausgehen. Diese Anwendungen decken verschiedene Aspekte – von der Datenerfassung und Auswertung über Prozessplanung bis zur digital unterstützten

Zusammenarbeit – ab. Direkt auf die Taktsteuerung zielt dabei der in [Binnerger u. Wolfbeiß, 2018a] beschriebene Ansatz ab.

Datenerfassung und -auswertung im Rahmen der Taktsteuerung: In [Binnerger u. Wolfbeiß, 2018a, S. 221-222] werden drei mögliche Stufen der digitalisierten Erfassung und Auswertung von Daten im Rahmen der Steuerung einer getakteten Baustelle erläutert. Diese wurden auf ihre praktische Anwendbarkeit hin untersucht, um eine Unterstützung des Berichtswesens zu erreichen. Die drei Stufen sind mit ansteigendem Digitalisierungsgrad:

1. Informationen wie bisher erfassen und im Anschluss manuell digitalisieren
2. Teil-automatisierte Lösung mittels Optical Character Recognition (OCR) oder digitalen Stiften
3. Datenaufnahme per App mit mobilen Endgeräten

Die manuelle Digitalisierung ermöglicht es, Informationen von Taktsteuerungstafeln in bestehende Softwaresysteme zu übertragen, erfordert jedoch eine zuverlässige und regelmäßige manuelle Eingabe der Daten. Aufgrund des manuellen Charakters ist diese Vorgehensweise zeitintensiv und sehr fehleranfällig.

Die Auswertung mittels OCR erfordert das tägliche Einsammeln der Dokumente von den Taktsteuerungstafeln zum optischen Scannen und eine nachträgliche Kontrolle der Richtigkeit der erfassten Inhalte und ist somit sehr zeitaufwändig und fehleranfällig.

Eine direkte digitale Datenaufnahme mithilfe von Apps ist derzeit noch nicht praxistauglich, da dadurch die bisherige Arbeitsweise an den Taktsteuerungstafeln nicht zielführend unterstützt wird. Die benötigten Daten liegen in digitalen Systemen vor, sind aber aufgrund mangelnder Einbindung in die Taktsteuerungsprozesse und fehlender Vernetzung auf der Baustelle nicht direkt verwendbar.

Ein Beispiel für eine erfolgreiche Implementierung in einem Unternehmen stellt die Datenaufnahme mittels eines digitalen Stiftes (s. [Schüler, 2011]) dar. Dabei werden die von Hand mit einem mit Sensoren ausgestattetem Kugelschreiber geschriebenen Inhalte sowohl auf Papier geschrieben, als auch digital erfasst. Auch diese Vorgehensweise unterliegt Einschränkungen: Es werden eine ausreichende Helligkeit und ein qualitativ hochwertiger Ausdruck des zur Erfassung benötigten Rasters auf speziellem Papier benötigt. Auch kann es zu einem doppelten Erfassen von Daten kommen. Darüber hinaus ist diese Art der Datenerfassung wenig flexibel, da auf vordefinierten Ausdrucken gearbeitet werden muss. Zudem muss in digitalen Systemen eine Erkennung der Handschrift stattfinden und die digitalisierten Daten müssen in weiterverarbeitende Systeme – bspw. zur Berechnung von Kennzahlen oder Aktualisierung von Terminplänen – überführt werden. Trotz dieser Einschränkungen werden in der Praxis Daten bei Taktbespre-

chungen mit diesem System erfasst, sodass es zu einer effizienteren Projektabwicklung und Digitalisierung der Informationen beiträgt.

Eine Verknüpfung der erfassten Daten mit dem Bauwerksmodell, Prozessen oder anderen Informationen wird bei keiner der geschilderten Vorgehensweisen erwähnt.

Online-Plantafeln: Ein weiterer bereits in der Praxis eingeführter Ansatz wird in [Sommer, 2016, S. 232] beschrieben (s. Abbildung 3-1). Er besteht in dem digitalen Erfassen und Darstellen von „Arbeitskarten“ in Plantafeln auf Basis einer Online-Plattform zur Unterstützung der Baustellensteuerung auf getakteten Baustellen. Die Arbeitskarten bilden die Arbeitsleistungen je Unternehmen und Arbeitstag mit einem räumlichen Bezug ab. Im Bauablauf entstehende Probleme können damit leicht zugeordnet und visualisiert werden.

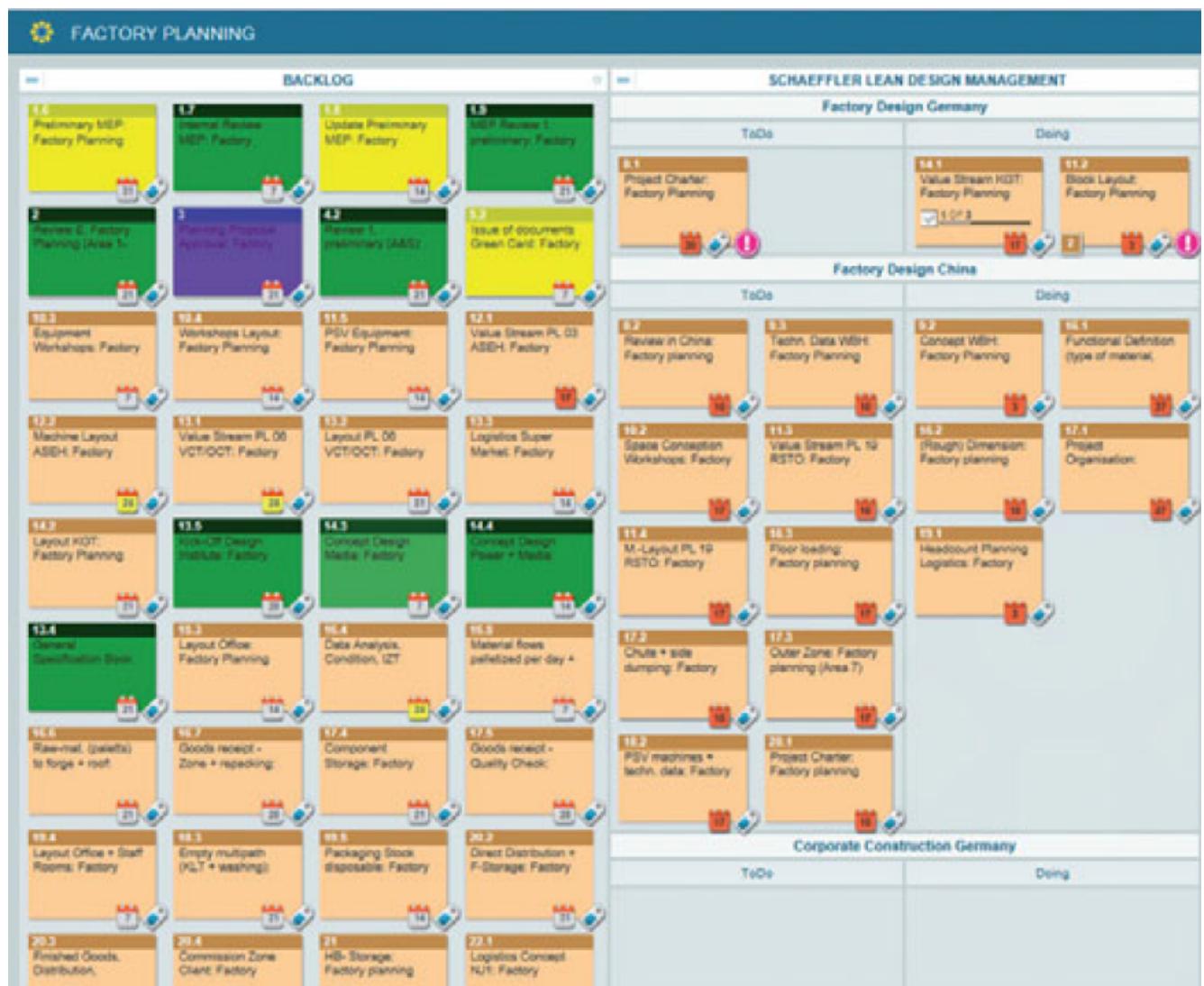


Abbildung 3-1: Beispiel einer Online-Plantafel (Abbildung aus [Sommer, 2016, S. 232])

Das Softwaresystem kann auf verschiedenen Endgeräten genutzt werden, sodass bspw. Bauleitung und Poliere Zugriff auf die selben Daten haben. Es wird explizit hervorgehoben, dass diese

Möglichkeit des digitalen Arbeitens nicht das persönliche Zusammenkommen der Beteiligten vor Ort ersetzt. Dieses bildet weiterhin einen zentralen Baustein der LC-basierten Arbeitsweise. In dem System werden auch Kennzahlen erfasst und darauf basierende Soll-Ist-Vergleiche durchgeführt. Allerdings erfolgt die Darstellung dieser Inhalte über an Tafeln ausgehängte Ausdrucke. Auch eine Verknüpfung der durch die Arbeitskarten abgebildeten Prozesse mit weiteren Informationsbereichen, wie dem Bauwerksmodell, wird nicht beschrieben.

Digitaler Big-Room: Die Anwendung digitaler Werkzeuge zur Unterstützung von Besprechungen in virtuellen Räumen zeigt sich bspw. in dem in [Wagner, 2017, S. 35-37] dargestellten digitalen Big-Room. Als Grundlage werden Arbeitsaufgaben im Rahmen der Wochenplanung digital erfasst und können auf Tablets dargestellt werden. Das zentrale Datensystem dient als Basis für virtuelle Besprechungen und Videokonferenzen zwischen internen und externen Beteiligten verschiedener Standorte. So können alle Teilnehmer ortsunabhängig auf einer aktuellen Informationsbasis arbeiten.

3.2.3 Softwarelösungen

Neben den in Wissenschaft und der Baupraxis entwickelten Ansätzen – bzw. zum Teil daraus hervorgehend – sind verschiedene Softwareprodukte auf dem Markt, die zur Unterstützung einer LC-basierten Arbeitsweise dienen können. Sie unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Anwendungsgebiete, der technischen Basis und dem Umfang der Integration der BIM-Methodik sowie digitaler Technologien.

VisiLean

Die webbasierte Anwendung VisiLean ist eine „integrierte Lean und BIM Lösung“ [VisiLEAN] zur Lean-basierten Produktionsplanung. Sie baut auf einem in [Dave u. a., 2011] vorgestellten Konzept auf. Der Schwerpunkt dieser Anwendung liegt auf der kollaborativen, modellbasierten Erfassung und Verfolgung der Herstellungsprozesse. Sie besitzt verschiedene Ansichten zur Darstellung von Prozessen und deren Auswertungen. Zur Integration von BIM-Daten unterstützt sie das Datenaustauschformat IFC und besitzt einen „BIM Modelviewer“, in dem durch die Verknüpfung von Herstellungsprozessen und Bauwerksmodell Ablaufsimulationen dargestellt werden können (s. Abbildung 3-2).

Yolean

Bei Yolean handelt es sich um eine webbasierte Prozessmanagement-Plattform zur Prozessplanung und -überwachung, welche die Anwendung des Last Planner System® oder der Taktsteuerungsmethode ermöglicht. Yolean ist ausschließlich auf die Prozessebene beschränkt und

stellt keine Verknüpfung zu Bauwerksmodellen oder weiteren Informationsbereichen her. [Weik, 2019]

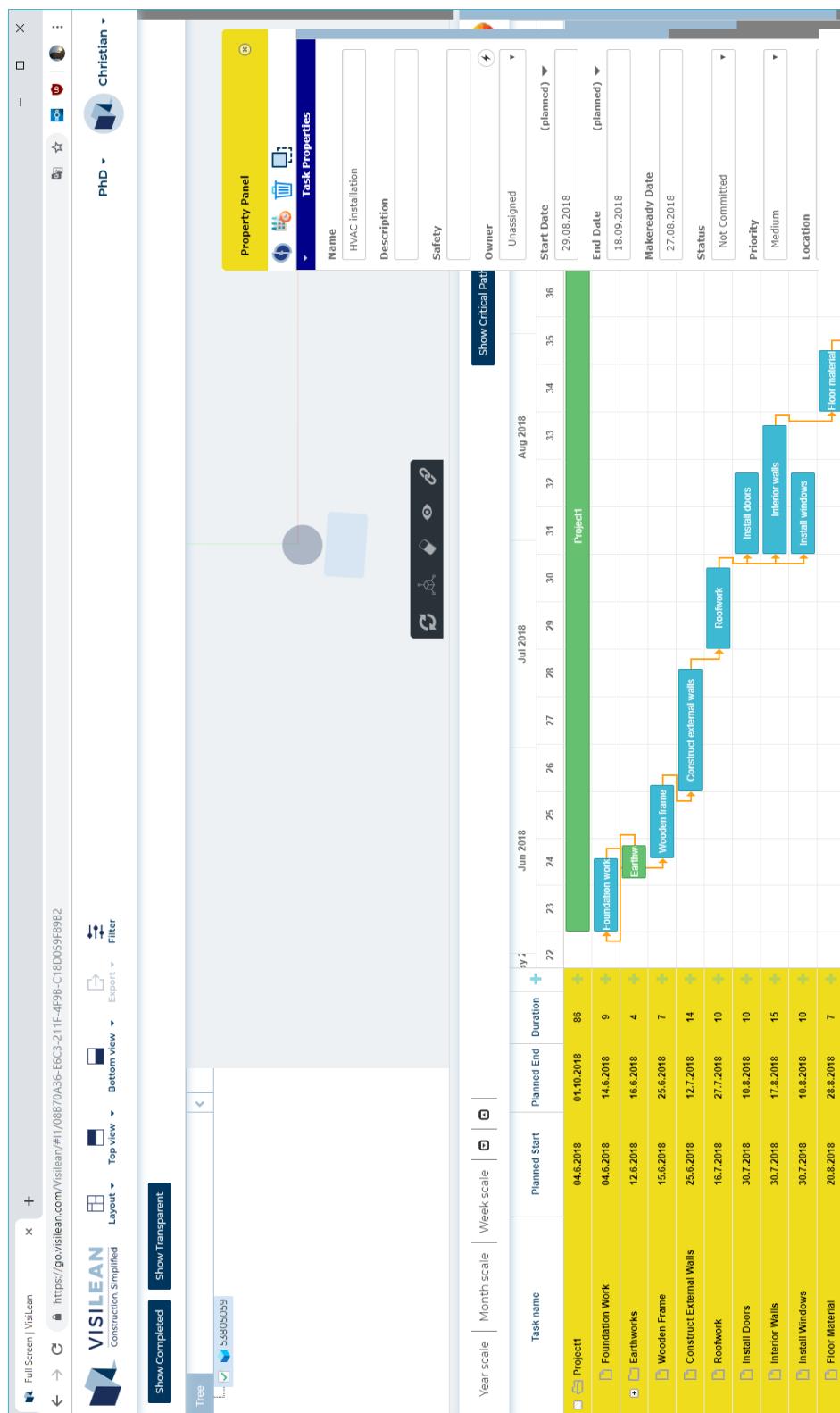


Abbildung 3-2: Screenshot der Anwendung VisiLean (Anmerkung d. Autors: Ein 3D-Modell konnte mit einem Testzugang auch nach Anfrage bei dem Support nicht erfolgreich geladen werden.)

BIM 360

Unter der Marke BIM 360 fasst die Firma Autodesk webbasierte Softwareprodukte zur kollaborativen Anwendung in verschiedenen Aufgabenbereichen und Projektphasen zusammen [Autodesk, d]. Als eine auf LC-Prinzipien aufbauende Anwendung wird dabei BIM 360 Plan unter dem Ansatz „mobile-first“ vermarktet [Autodesk, g]. Aufgrund der webbasierten Umsetzung kann sie auf beliebigen Endgeräten in der Produktionsplanung eingesetzt werden. Als Anwendungsziel wird die Reduktion von Verschwendungen in Überproduktion, Bestand und Nacharbeiten herausgestellt. BIM 360 Plan bietet die Möglichkeit, Aufgaben anzulegen und diesen Zuständigkeiten (Personen, Unternehmen), Ressourcen (Kolonnenstärke) Termine und Dauern sowie Orte zuzuordnen. Der Status von Aufgaben kann erfasst werden, sodass daraus die Percent Plan Complete (PPC) Kennzahl abgeleitet und visualisiert werden kann. Eine Verknüpfung zu digitalen Bauwerksmodellen besteht bei BIM 360 Plan nicht. BIM 360 Plan ist im Gegensatz zu anderen BIM 360 Anwendungen nicht über offene Programmierschnittstellen ansprechbar und damit nicht direkt in anderen Anwendungen integrierbar.

Weitere für die Bauausführung nutzbare BIM 360 Anwendungen sind BIM 360 Docs zum Dokumentenmanagement sowie BIM 360 Build zur Leistungserfassung und -überwachung mit einer integrierten Projektübersicht sowie Möglichkeiten zur Unterstützung des Berichtswesens, des Mängel- und Qualitätsmanagements und der Arbeitssicherheit.

vPlanner

Wie BIM 360 Plan dient die Software vPlanner der cloud-basierten Produktionsplanung im Sinne des Last Planner System® [Ghafari Associates, 2018]. Es wird herausgestellt, dass mit dieser Software eine Verbindung zwischen der kurzzyklischen Wochenplanung und der übergeordneten, langfristigen Projektplanung hergestellt werden kann. Schwerpunkte liegen auf der dynamischen Visualisierung von Abläufen und deren Abhängigkeiten sowie auf dem visuellen Filtern. Durch die webbasierte Umsetzung wird eine kollaborative Zusammenarbeit von Teams ermöglicht. Eine Verknüpfung zu digitalen Bauwerksdaten ist nicht vorhanden. Ebenso verfügt vPlanner nicht über offene Schnittstellen.

Fuzor

Kern der Software Fuzor ist die Visualisierung des Bauwerksmodells in 2D, 3D und Virtual Reality mit dem Ziel, Projektbeteiligten aus verschiedenen Arbeitsbereichen eine gemeinsame Umgebung zur Kollaboration zu bieten. Es wird nicht direkt mit einer Integration in die LC-Arbeitsweisen geworben, jedoch entsprechen die Kernansätze der Visualisierung und Kollaboration wichtigen LC-Aspekten. Bei Fuzor handelt sich um eine Suite mehrerer Teilprodukte aus den Bereichen Design und Construction zum Einsatz über alle Projektphasen. Auch wer-

den Kollisionsprüfungen und einfache Lichtsimulationen ermöglicht. Es stehen Schnittstellen zu vielen etablierten Softwareanwendungen aus den Bereichen Design und Projektmanagement bereit. Fuzor bietet darüber hinaus eine API, die es Entwicklern erlaubt, weitere externe Anwendungen anzubinden.

3.2.4 Derzeitige Arbeitsweisen in Taktplanung und Taktsteuerung

Um die Chancen, die die Schaffung einer gesamtheitlichen, digitalen Wertschöpfungskette im Bauwesen unter Anwendung der Lean-Ansätze bieten kann, zu ermitteln, können die Prozesse aller Beteiligten über alle Projekt- und Lebenszyklusphasen hinweg sowie die jeweils anwendbaren LC-Prinzipien, -Methoden und -Werkzeuge auf Möglichkeiten der digitalen Unterstützung und dabei insb. auf Überschneidungen mit Elementen der BIM-Methodik hin überprüft werden. In diesem Kontext wird in der vorliegenden Arbeit als eine wichtige und in der Praxis anerkannte Methode die auf dem Taktprinzip aufbauende Taktplanung und -steuerung der Baustelle untersucht. Diese Methode findet bereits häufig in der Praxis Anwendung (vgl. z. B. [Binnerger u. Wolfbeiß, 2018b]). Sie wird in den Anwendungsbereich der Organisation und Steuerung eingeordnet, ihr Hauptanwendungsbereich ist die Unterstützung der Bauausführung sowie deren Vorbereitung. Sie hat vor allem Einfluss auf die Zieldimensionen Zeit, Kosten und Varianzreduzierung. [Verein deutscher Ingenieure, 2019, Tabelle A1, S. 40]

Einordnung des Taktungsansatzes in Projektphasen

Zur Einordnung des Taktungsansatzes in die Projektphasen ist in [Verein deutscher Ingenieure, 2019, S. 22-24] ein Vorschlag eines möglichen Ablaufs der Einführung von LC in Bauprojekten unter Einbeziehung des Taktungsansatzes dargestellt (vgl. Abbildung 3-3). Voraussetzung ist die frühzeitige Vorstellung und Vereinbarung einer LC-basierten Projektdurchführung mit dem Auftraggeber. Unterstützend wirkt sich eine partnerschaftliche Projektabwicklungsform aus. Sind LC-spezifische Grundlagen geschaffen, so kann der Taktungsansatz im Projekt eingeführt werden. Dies geschieht in der Ausführungsvorbereitung mit der Planung und Durchführung von Workshops. Bis zu Beginn der Bauausführung müssen nicht nur die Bauprozesse geplant, sondern auch die Steuerungsprozesse definiert und die benötigten Materialien vorhanden sein. Zur Taktsteuerung werden Taktsteuerungstafeln eingesetzt, die frühzeitig bestellt und auf der Baustelle eingerichtet werden müssen. Mit der Bauausführung beginnt die Anwendung eines in der Taktplanung erstellten, getakteten Feinterminplans. Die Überwachung der Einhaltung der Takte erfolgt im Rahmen der Taktsteuerung durch die Kontrolle des Baustellenstatus. Dazu werden u. a. Kennzahlen überwacht und wöchentliche sowie tägliche Besprechungen durchgeführt. Als zentrales Werkzeug werden die Taktsteuerungstafeln eingesetzt.

Lean Projektinitialisierung	Angebotsfertigstellung	Ausführungs vorbereitung	Bauausführung	Nachbereitung
Taktplanung Taktsteuerung	(6) Austaktungsworkshop terminieren (9) Austaktungsworkshop vorbereiten und durchführen (12) Bestellung von Taktsteuerungstafeln (TST) (15) Bestückung der Baustelle mit TST	(19) Implementierung der Taktplanung (getakteter Feinterminplan) auf der Baustelle: Taktungsstart auf der Baustelle (20) Systematische Kontrolle der Takteinhaltung durch Kennzahlensteuerung durch Tages- und Wochen-besprechungen (21) Monatliches Reporting an Bereichsleitung		

Abbildung 3-3: Einordnung des Taktungsansatzes in Projektphasen (Eigene Darstellung, in Anlehnung an [Verein deutscher Ingenieure, 2019, Bild 1, S. 23])

Taktplanung

Datengrundlage: Als Datengrundlage der Taktplanung liegen bestenfalls digitale Bauwerksmodell sowie damit verknüpfte Terminpläne mit Vorgängen und zugeordneten Ressourcen vor. Dies ist jedoch derzeit noch in nur wenigen BIM-basiert abgewickelten Bauprojekten gegeben. Im Regelfall liegen keine oder unzureichende digitale Bauwerksmodelle vor und Verknüpfungen mit Prozessen und Ressourcen werden nicht vollständig digital erfasst. Zudem werden Informationen, die im Zuge der Eintaktung der Herstellungsprozesse generiert werden, in der Praxis häufig in separaten Systemen dokumentenbasiert festgehalten, sodass nur ein kleiner Teil der komplexen Zusammenhänge digital erfasst wird.

Stand der Softwareunterstützung: Das Durchführen der Taktplanungsprozesse erfolgt derzeit auf dieser Informationsbasis in überwiegend manueller Form mit Standardsoftware wie Tabellenkalkulationssoftware. Auch kommen zum Teil „Lean“-Softwarelösungen zum Einsatz, bei denen keine Verknüpfungen zwischen Prozessen, Ressourcen und Bauwerksmodell bestehen (vgl. 3.2.3). In BIM-basiert abgewickelten Projekten mit digitalen Bauwerksmodellen und einer vernetzten Datenbasis erfolgt die Taktplanung in Teilen bereits durch regelbasierte Verknüpfungen in teilweise automatisierter Form, bspw. durch Anwendung der Software ceapoint desite MD [ceapoint aec technologies GmbH]. Es handelt sich bei der Taktplanung jedoch um eine komplexe Optimierungsaufgabe mit mehreren Zielgrößen; unter Einhaltung vielfältiger Randbedingungen soll ein Taktplan erstellt werden, der es ermöglicht, in kürzester Zeit mit einem optimalen Ressourceneinsatz und möglichst geringen Kosten das Bauwerk in der gewünschten Qualität herzustellen. Die aktuelle Herangehensweise in der Taktplanung führt dazu, dass bis zur Entscheidung für eine Lösung meist mehrere Iterationen mit verschiedenen Varianten „durchgerechnet“ werden müssen.

Taktsteuerung

In der Bauausführungsphase finden im Rahmen der Taktsteuerung (vgl. 2.5.2) eine permanente Überwachung und Steuerung der Herstellungsprozesse statt. Wichtige Grundlagen dafür bilden die stetige Aufnahme, Verarbeitung, Verfügbarkeit und Visualisierung von Informationen über den aktuellen Stand der Baustelle. Als zentrales und sichtbarstes Steuerungswerkzeug werden bei einer nach dem Taktprinzip geplanten Bauausführung Taktsteuerungstafeln (vgl. 2.5.3) eingesetzt [Sommer, 2016, S. 231]. Auf ihnen können Informationen wie Takt-, Grundriss- und Bauzeitenpläne, allgemeine Baustelleninformationen, Bewertungen von Ordnung, Sauberkeit und Arbeitssicherheit u. v. m. dargestellt werden. Sie werden im Baufeld in den jeweiligen Taktabschnitten aufgestellt. Zusätzlich können Taktsteuerungstafeln, Kennzahlenboards und weitere Hilfsmittel im Baucontainer, bspw. in einem Projektsteuerungsraum, vorgehalten werden.

Bei der Arbeit mit solchen analogen Taktsteuerungstafeln werden neu gewonnene Informationen meist zunächst lokal auf der Baustelle festgehalten. Um diese in digitale Systeme, wie Dokumentenmanagementsysteme, digitale Bauwerksmodelle, digitale Terminpläne, oder digitale Bautagebücher zu überführen und über die Taktsteuerung hinaus für bspw. das Berichtswesen nutzbar zu machen, müssen sie im Anschluss digitalisiert werden. Dasselbe gilt in entgegengesetzter Richtung: In digitalen Systemen erstellte oder veränderte Informationen müssen durch das Aufhängen oder Austauschen von Ausdrucken (Gebäudepläne, Terminpläne etc.), das Verschieben von Karteikarten oder händisches Markieren in analoger Form aktualisiert werden.

Darüber hinaus besteht eine große Herausforderung in der räumlichen Trennung der Aufnahme von Daten und deren Nutzern. Durch die kurzyklische Taktsteuerung und die dabei erhobenen Daten würde prinzipiell ein detailliertes Berichtswesen ermöglicht. Bauunternehmen sind allerdings häufig an mehreren räumlich weit verteilten Bauprojekten beteiligt. Es ist daher nicht ausreichend, Informationen mit Taktsteuerungstafeln vor Ort zu erfassen und ausschließlich auf diesen darzustellen. [Binninger u. Wolfbeiß, 2018a, S. 219]

Aktuelle Entwicklungen in der Taktsteuerung zielen darauf ab, diese manuell und analog durchgeführten Vorgänge zu digitalisieren (vgl. 3.2.2). Dabei werden Prozesse jedoch nicht ganzheitlich im Sinne einer digitalen Transformation neu gedacht. Meist wird darauf abgezielt, die derzeitige Arbeitsweise digital zu unterstützen.

3.3 Forschungsbedarf und Möglichkeiten zur digitalen Transformation der Taktplanung und Taktsteuerung

Nachfolgend wird der aus der vorangegangenen Analyse abgeleitete Forschungsbedarf zusammengefasst. Im Anschluss daran folgt die Vorstellung von Ansätzen zur digitalen Transformation der Taktplanung und -steuerung, die die Grundlage zur Entwicklung des vorgestellten Konzeptes bilden. Die Basis zur digitalen Unterstützung der Taktplanung und -steuerung bil-

den dabei Informationen und insb. die strukturierte Erfassung und Speicherung der Daten. Nur durch diese Grundlage werden auch die im weiteren Verlauf dieser Dissertation beschriebenen Anwendungen, wie automatisierte Auswertungen oder interaktive Darstellungen, ermöglicht. Einen zentralen Angriffspunkt dazu bilden digitale Bauwerksmodelle, die im Kontext der LC alle taktplanungs- und taktsteuerungsrelevanten Informationen mit Bauwerksbezug beinhalten.

3.3.1 Forschungsbedarf

In 3.2 werden Forschungsansätze zur Untersuchung der gemeinsamen Anwendung von LC und digitaler Technologien und Methoden vorgestellt. Aufgrund der zahlreichen Synergien und Überschneidungen steht meist vor allem die Einordnung in und Untersuchung der BIM-Methodik im Fokus. Ein weiterer Schwerpunkt in der wissenschaftlichen Auseinandersetzung auf diesem Themenfeld liegt in der Optimierung der Bauprozesse im Sinne einer effizienten Produktionsplanung, -überwachung und -steuerung. Auch wurden Ansätze zur Optimierung der Informationserfassung untersucht. In mehreren Arbeiten wird herausgestellt, dass eine Verknüpfung digitaler Bauwerks- mit Prozessdaten und eine darauf aufbauende Visualisierung der Zusammenhänge zu Effizienzsteigerungen führen können.

Entwicklungen sowohl aus der Baupraxis als auch seitens der Softwareindustrie zielen derzeit auf eine Digitalisierung bestehender Methoden und Werkzeuge unter punktualem Einsatz digitaler Technologien ab. Die dahinterliegenden Prozesse werden kaum verändert. Eine digitale Transformation, bei der ausgehend von dem zu erreichenden Ergebnis Prozesse unter Nutzung neuer, digitaler hardware- sowie softwareseitiger Möglichkeiten restrukturiert werden, findet selten statt.

Viele Systeme nutzen als einen zentralen Vorteil der digitalen Arbeitsweise die ortsungebundene Verfügbarkeit von Daten, Möglichkeiten zu deren (teil-) automatisierter Auswertung und Visualisierung mittels webbasierter resp. vernetzter Plattformen. In der Regel richten sich diese Systeme an das Baustellen- und teils an das Unternehmensmanagement. Die sich aus der digitalen Arbeitsweise ergebenden Möglichkeiten, weitere Anwendergruppen ansprechen und neue Anwendungsfälle einbeziehen zu können, werden selten thematisiert. Darüber hinaus besitzen diese wenig flexiblen Softwareanwendungen starre Strukturen – sowohl in der Anwendung, als auch hinsichtlich der Möglichkeiten zur individuellen Gestaltung bspw. der Benutzeroberflächen. Sie geben somit Arbeitsweisen vor und sind nicht an die im Bauwesen stark variierenden individuellen Projektstrukturen und -rahmenbedingungen anpassbar.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass sowohl in Forschung als auch in der Praxis bereits Schritte hin zu einer digitalen Wertschöpfungskette im Bauwesen unter Anwendung der LC-Arbeitsweise gemacht wurden. Es besteht jedoch weiterhin großer Forschungs- und Entwicklungsbedarf insb. hinsichtlich der Betrachtung konkreter Werkzeuge und Anwendungen, die in eine ganzheitlich betrachtete Implementierung integriert werden können.

Forschungsbedarf bei Taktplanung und Taktsteuerung

Arbeiten im Kontext der digitalen Unterstützung des Taktungsansatzes setzen sich mit verschiedenen Aspekten auseinander, die insb. die Prozesssteuerung und dazu notwendige Informationserfassung und -digitalisierung aufgreifen. Es existieren keine Softwareanwendungen oder wissenschaftliche Arbeiten, in denen eine integrierte, durchgängig digitale und BIM-basierte Taktplanung und darauf aufbauende Taktsteuerung auf Basis einer gemeinsamen Datenbasis beschrieben wird. Die Möglichkeiten, durch ein ganzheitliches System einen einheitlichen, durchgängigen Informationsfluss sicherzustellen, werden somit nicht ausgenutzt. Durch die Anwendung digitaler Ansätze werden bisher kaum neue Anwendungsmöglichkeiten geschaffen, die sich von den bisherigen Arbeitsweisen unterscheiden.

3.3.2 Ansätze zur digitalen Transformation der Taktplanung und Taktsteuerung

Taktplanung

Durch den verstärkten Einsatz digitaler Methoden und Werkzeuge, digitale Bauwerksmodelle als Teil einer digitalen Datenbasis sowie eine Verknüpfung aller Informationen lassen sich viele Vorgänge in der Taktplanung vereinfachen und in Teilen oder vollständig automatisiert durchführen. Dies kann das Finden des optimalen Taktplans der Baustelle unterstützen.

Über eine Digitalisierung der einzelnen Schritte hinausgehend kann auch eine Überarbeitung und Restrukturierung der Prozesse im Sinne der digitalen Transformation unter Anwendung der und Eingliederung in die BIM-Methodik von Vorteil sein. Dies wird insb. an der Durchführung von aufwändigen Plausibilitätskontrollen deutlich. Dieser Schritt ist essentiell zur Eintaktung der Baustelle, jedoch sehr aufwändig, da viele Informationen aus verschiedenen Bereichen ermittelt und miteinander verknüpft werden müssen. Er erfolgt daher in jeder Iteration der Taktplanung nur einmal. Eine digitale, vernetzte Datenbasis ermöglicht es hingegen, im Hintergrund und stets auf dem aktuellen Planungsstand aufbauend bei allen Aktionen solche Überprüfungen durchzuführen und bereits frühzeitig nicht plausible Planungen zu verhindern.

Taktsteuerung unter Anwendung von Taktsteuerungstafeln

Im Folgenden werden als Grundlage für das in Kapitel 5 vorgestellte Konzept Ansätze beschrieben, wie die Taktsteuerung und im Speziellen Taktsteuerungstafeln von einer stärkeren Anwendung digitaler Methoden und Werkzeuge profitieren können.

Effizienzsteigerung in Taktbesprechungen: Die zwei wesentlichen Bestandteile der Taktsteuerung sind tägliche und wöchentliche Besprechungen (vgl. 2.5.2) an Taktsteuerungstafeln. In diesen Besprechungen bilden Taktsteuerungstafeln die zentrale Informationsbasis. Neben der Durchführung mit allen Beteiligten sind Besprechungen durch Bauleitung und Poliere vor- und

nachzubereiten. Wie in Abbildung 3-4 qualitativ dargestellt, findet während allen drei Phasen ein Informationszuwachs statt.

In [Grund, 2018, S. 70-74] werden Abläufe zur Vor- und Nachbereitung sowie zur Durchführung von Besprechungen und der Ableitung von Maßnahmen beschrieben. Es wird gezeigt, dass die Schritte der Datenaufnahme, -auswertung und -darstellung digital unterstützt werden können, sodass sie effizienter und teilautomatisiert durchgeführt werden können und so die Effizienz in dem Gesamtprozess verbessert werden kann.

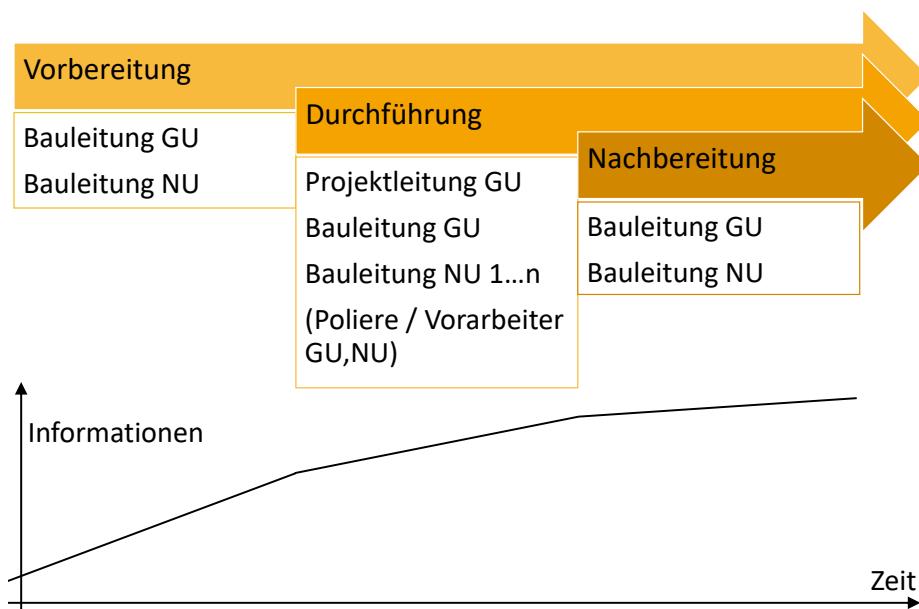


Abbildung 3-4: Informationszuwachs während Vorbereitung, Durchführung und Nachbereitung von Taktbesprechungen am Beispiel der in 5.2 beschriebenen Projektstruktur (Eigene Darstellung)

Schaffung einer verlässlichen Informationsbasis: Taktsteuerungstafeln können über Besprechungen hinaus als ständig verfügbare Informationsbasis genutzt werden. Alle Personen mit Zugang zu ihrem Aufstellungsort können die dargestellten Informationen somit jederzeit einsehen. Wesentlich für diesen Einsatzzweck sind der richtige Umfang der dargestellten Informationen sowie deren Aktualität, Richtigkeit und Verbindlichkeit. Werden Inhalte in unzureichendem Umfang dargestellt, sind sie nicht aktuell, nicht akkurat oder unverbindlich, so können sie nur als Ausgangspunkt für einen weitergehenden Informationsaustausch durch zusätzliche Kommunikation und andere Medien dienen.

Das Vorhalten einer synchronisierten, digitalen Datenbasis und eine direkte digitale Darstellung der Inhalte kann dazu beitragen, eine verlässliche Informationsbasis zu schaffen, die dadurch im produktiven Arbeitsbetrieb stärkere Anwendung finden kann. Somit können unnötige Verschwendungen im Rahmen der Informationsbeschaffung vermieden werden. Auch ermöglicht

ein digitales System das Einführen eines Rechte managements, über das der Zugang zu Informationen auf Anwenderebene gesteuert werden kann.

Unterstützung der Datenaufnahme: Die Erfassung der auf Taktsteuerungstafeln darzustellenden Informationen findet vor allem im Rahmen der Besprechungsvorbereitung bei Begehung en sowie während der Durchführung von Besprechungen im Baufeld, also am Ort der Wertschöpfung, statt. Bislang geschieht dies nicht in einem einheitlichen, durchgängig digitalen Ablauf in entsprechenden Softwareumgebungen. Die heterogenen Informationen werden analog mit Stift und Papier, teils direkt an den Taktsteuerungstafeln, sowie in verschiedenen, nicht automatisierbar weiterverarbeitbaren unstrukturierten oder semistrukturierten Datenformaten, wie Fotografien oder Textdokumenten, am Computer erfasst.

Durch eine digital durchgeführte Datenaufnahme entfallen aufwändige manuelle Schritte zur Digitalisierung der Daten im Nachgang. Daten können zudem durch den Einsatz neuer digitaler Technologien (hardware- und softwareseitig) einfacher, umfangreicher, teilweise automatisiert und mit höherer Auflösung und Qualität aufgenommen werden. Überdies können digital aufgenommenen Daten sofort weiterverarbeitet, miteinander verknüpft und bereits vor Ort auf Plausibilität hin geprüft werden. Sich wiederholende Aufgaben können durch die Nutzung digitaler Vorlagen und eine Auswertung bereits erfasster Daten sowie daraus abgeleiteter Vorschläge vereinfacht werden. Die Qualität der aufgenommenen Daten kann somit deutlich verbessert werden. Auch Metainformationen können bei der Datenaufnahme selbst erfasst werden. Dies sind bspw. Informationen zu der aufnehmenden Person, Ort oder Zeitpunkt.

Single Source of Truth: Durch die bisherige Vorgehensweise bei der Datenaufnahme und -haltung liegen Informationen lokal verteilt, redundant und parallel in digitalen sowie analogen Medien gespeichert vor. Diese Redundanzen und fehleranfällige Synchronisations- bzw. Aktualisierungsvorgänge erschweren die Einhaltung des Konzeptes einer Single Source of Truth, also dem Vorhandensein eines verlässlichen, allgemeingültigen und korrekten Datenbestandes [Bär u. Purtschert, 2014, S. 15-16]. Die Ausführung der Bauprozesse basiert auf den auf Taktsteuerungstafeln dargestellten Informationen. Werden die Taktsteuerungstafeln daher als maßgebende Datenquellen definiert, so sind diese analogen Informationsquellen nur lokal zugängig und werden nicht automatisch synchronisiert.

Mit dem Einsatz eines digitalen Systems können Daten verteilt verwaltet und gleichzeitig deren Richtigkeit sichergestellt werden. Eine Voraussetzung dafür ist, dass die Systemkomponenten miteinander verknüpft sind. Durch die eindeutige Definition von Datenstrukturen und -austauschvorgängen sowie Schnittstellen kann eine Synchronisation zwischen allen Speicherorten durchgeführt werden. Dies ermöglicht es, dass Inhalte ortsunabhängig zugegriffen und verwendet werden können. Zudem kann so bspw. ein „offline“ Arbeiten auf der Baustelle bei Unterbrechungen der Kommunikationsversorgung ermöglicht werden.

In diesem Kontext kann die Einbindung verschiedener Softwarelösungen in eine gemeinsame Datenumgebung (CDE) erfolgen.

Automatisierung von Datenverarbeitung und -aktualisierungen: Nach der Überführung analoger Daten in digitale Systeme erfolgt bisher eine manuelle Weiterverarbeitung bzw. Nachbearbeitung. Kennzahlen werden dazu bspw. in Tabellenkalkulationsanwendungen berechnet und daraus Diagramme abgeleitet. Die so erstellten Informationen werden auf Papier ausgedruckt und müssen im Baufeld an – ggf. mehreren – Taktsteuerungstafeln händisch ausgehängt werden. Ebenso müssen Änderungen, wie bspw. handschriftliche Ergänzungen oder Markierungen, die an einem Ort, z. B. an einer Taktsteuerungstafel im Baufeld, vorgenommen werden, manuell zurück in digitale Systeme übertragen werden, um diese neu gewonnenen Informationen für weiterführende Verwendungszwecke nutzbar zu machen. Dieser Medienbruch führt dazu, dass keine direkte Verknüpfung mehr zwischen Datenhaltung und Visualisierung besteht. Es muss eine stetige, manuelle und bidirektionale Synchronisation aller Informationen zwischen digitalen Systemen und den Taktsteuerungstafeln stattfinden. Solche manuell durchzuführenden Prozesse sind zeitaufwändig und im Sinne der Lean-Denkweise nicht wertschöpfend.

Durch die Anwendung eines durchgängig digitalen Systems können die beschriebenen ineffizienten, manuellen Abläufe in der Datenverarbeitung und -aktualisierung dahingehend verändert werden, dass eine deutlich stärkere Automatisierung stattfinden kann. Somit können die Bauleitung entlastet und die Produktivität und damit die Wertschöpfung gesteigert werden.

Kontextsensitive Visualisierung und höhere Flexibilität: Die Visualisierung von Informationen über Ausdrucke und die Nutzung von Stift und Papier zur Informationsverwaltung an Tafeln schafft einerseits eine hohe Flexibilität. Unabhängig von Daten- und Inhaltstypen oder Einschränkungen durch Software können beliebige Inhalte händisch festgehalten werden. Andererseits bestehen keinerlei Möglichkeiten zu weiteren Interaktionen des Anwenders mit den Inhalten oder zum spontanen Abrufen zusätzlich benötigten, weiterführenden Wissens. Die auf den Ausdrucken dargestellten Inhalte sind nicht interaktiv, sodass sie nur genau in der vorliegenden Form betrachtet werden können. Wurde bspw. ein veralteter oder falscher Plan ausgehängt, so muss dieser entweder während einer Besprechung erneuert werden oder die Besprechung muss ohne vollständige Informationsbasis durchgeführt werden. Gerade bei den nur wenige Minuten dauernden täglichen Taktbesprechungen im Baufeld führt dies zu mangelnder Qualität und der Verschwendungen von Arbeitszeit.

Durch den Einsatz von Hardwaresystemen wie mobilen Endgeräten oder Computern mit Touchscreens können eine flexible, dem aktuellen Anwendungsfall entsprechende Visualisierung und die Interaktion mit den dargestellten Inhalten ermöglicht werden. Dies kann je nach Gerätetyp ortsunabhängig auf einer aktuellen Datenbasis geschehen. Somit kann sichergestellt werden, dass die richtigen (benötigten) Informationen zum richtigen Zeitpunkt für die richtigen Anwender vorliegen.

3.3.3 Anwendergruppen und Anwendungsfälle einer digital unterstützten Taktsteuerung

Durch die Nutzung digitaler Technologien und die Anwendung der BIM-Methodik können neue Möglichkeiten zur Organisation und Steuerung der Baustelle geschaffen und der Bezug zum herzustellenden Bauwerk gestärkt werden. Die im Rahmen der Taktsteuerung üblichen zyklischen Besprechungen und die damit zusammenhängenden Prozesse der Datenaufnahme und -aufbereitung sowie die darzustellenden Inhalte analoger Taktsteuerungstafel bleiben dabei weiterhin essentieller Bestandteil der täglichen Arbeit. Jedoch sollen sie durch den Einsatz des in dieser Dissertation vorgestellten digitalen Systems GADGET.S deutlich effizienter durchgeführt resp. dargestellt werden können.

Als Anwendergruppen der Taktsteuerung werden in [Verein deutscher Ingenieure, 2019, S. 83]

- Oberbauleiter
- Projektleiter
- Bauleiter
- Verantwortliche der Gewerke (Poliere, Vorarbeiter)
- Prozessplaner / Lean-Experten

genannt. Diese sollen auch nach der Erweiterung und digitalen Umsetzung der Taktsteuerungstafel weiterhin im Fokus stehen. Darüber hinaus sollen als Nutzer auch

- ausführende Arbeitskräfte
- Bauherren bzw. deren Vertreter
- die Öffentlichkeit

berücksichtigt werden.

In Tabelle 3-1 sind Anwendergruppen und mögliche Anwendungsfälle von GADGET.S dargestellt. Die Anwendungsfälle im herkömmlichen Sinne der Taktsteuerung sind die täglichen und wöchentlichen Taktbesprechungen, der Einsatz der Taktsteuerungstafel als Informationsbasis zur Baustellensteuerung durch die Bauleitung sowie im Rahmen von Schulungen. Um aus den auf analogen Taktsteuerungstafel verwalteten Informationen Berichte – bspw. für das Management – oder Informationen für die Öffentlichkeit abzuleiten, sind viele manuelle Schritte notwendig. Das im Folgenden vorgestellte System soll solche Anwendungsfälle direkt abdecken. Überdies soll es bei der Nachbereitung von Projekten im Rahmen der Nachkalkulation als Informationsbasis eingesetzt werden. Durch den Einsatz desselben Systems in allen nachfolgend beschriebenen Anwendungsfällen soll eine auf diese anpassbare und für alle Beteiligten einheitliche Arbeitsumgebung geschaffen werden. Dies soll auch dazu beitragen, das Gemeinschaftsgefühl im Projekt zu stärken.

Tabelle 3-1: Übersicht über Anwendergruppen und Anwendungsfälle von GADGET.S am Beispiel der in 5.2 beschriebenen Projektstruktur (x: ja, (x): ggf.)

Anwendungsfall	Anwendergruppen								
	Bauleitung (GU)	Bauleitung (NU)	Projektleitung (GU)	Poliere / Vorarbeiter (GU, NU)	Arbeitskräfte (GU, NU)	Geschäftsleitung / Oberbauleitung (GU)	Bauherr / Bauherrenvertretung	Öffentlichkeit	Prozessplaner / Lean-Experten
Tägliche Besprechung	x	x	x	x					
Wöchentliche Besprechung	x	x	x	(x)					
Informationsbasis	x	x	(x)	x	x	(x)	(x)		
Informationserfassung	x		(x)	x					
Berichterstattung	x	(x)	x			x	x		
Nachkalkulation	x		x			(x)			
Dokumentation	x	(x)	(x)	x	(x)				
Öffentlichkeitsarbeit	(x)		(x)			(x)	x	x	
Schulungen	x	x	x	x		(x)	(x)	x	

Besprechungen

In den in 2.5.2 beschriebenen täglichen und wöchentlichen Taktbesprechungen zur Überwachung und Steuerung des Bauablaufs stellt die Taktsteuerungstafel das zentrale Werkzeug dar. Diese Besprechungen bilden – gemeinsam mit den dazugehörigen Prozessen der Datenaufnahme und -verarbeitung – zentrale Anwendungsfälle von GADGET.S.

Einsatzorte: Baustelle (tägliche Taktbesprechungen), Lean-/Projektsteuerungsraum (wöchentliche Taktbesprechungen)

Zyklus: täglich / (1- bis 2-) wöchentlich

Informationsbasis

Wie in 3.3.2 beschrieben, dienen herkömmliche, analoge Taktsteuerungstafel als ständige Informationsbasis für die Bauleitung, Vorarbeiter, Poliere und ausführenden Arbeitskräfte im Baualltag. Diese Aufgabe soll die GADGET.S übernehmen, indem aktuelle, auf die jeweilige Situation und den Anwender automatisch angepasste Informationen dargestellt werden. Beispielsweise können mit ihrer Hilfe von der Bauleitung (teil-) automatisierte Soll-Ist-Vergleiche durchgeführt werden. Arbeitskräfte können sich anstehende Arbeitsabläufe mit dazugehörigen Informationen zu Ausführung, Standorten von Geräten und Lagerorten von Materialien sowie ggf. Gefahrenhinweisen anzeigen lassen. Auch der Bauherr bzw. seine Vertretung auf der Baustelle kann die GADGET.S einsetzen, um jederzeit Informationen abzufragen.

Einsatzorte: Gesamtes Baufeld (Baustelle, Büros, Lean-/Projektsteuerungsraum)

Zyklus / Zeitpunkt: ständig / nach Bedarf

Informationserfassung

Ein wichtiger Aufgabenbereich der Baustellensteuerung ist die Erfassung bauablaufrelevanter Informationen. Diese bilden die Grundlage zur Beurteilung des Standes der Baustelle und dienen damit der Ableitung durchzuführender Handlungen. Sie werden im Rahmen von Besprechungen, Begehungungen (bspw. Notizen, Fotografien) und i. A. den Tätigkeiten der Bauleitung gewonnen.

Einsatzorte: Gesamtes Baufeld (Baustelle, Büros, Lean-/Projektsteuerungsraum)

Zyklus / Zeitpunkt: ständig / nach Bedarf

Berichterstattung

Die bei der Baustellensteuerung anfallenden Informationen, die durch die GADGET.S bereitgestellt werden, sind – in teils aggregierter und abstrakter Form – relevant für die Berichterstattung an den Auftraggeber bzw. Bauherren sowie an übergeordnete Managementebenen, bspw. im Zuge von internen Leistungsmeldungen, Berichten über Baustellenergebnis oder der Übermittlung von Kennzahlen. Zur Darstellung dieser Berichte und als Diskussionsgrundlage im Austausch der Projektleitung mit dem Management soll daher ebenfalls GADGET.S genutzt werden können.

Einsatzorte: Büros (Baustelle: Bauleitung / Poliere, Firmenniederlassung: Geschäftsführung, Bauherr)

Zyklus: nach Bedarf (täglich / wöchentlich / monatlich)

Nachkalkulation

Die im Rahmen der Bauausführung erhobenen Informationen, wie Kennzahlen oder Details zu Problemen und (Lösungs-) Maßnahmen, können in der Projektnachbereitung aufgearbeitet werden. So kann das gewonnene Wissen für künftige Projekte nutzbar gemacht werden. Da diese Informationstypen bereits während der Bauausführung durch GADGET.S erfasst, verarbeitet und dargestellt werden können, können diese Funktionalitäten des Systems auch in der Nachkalkulation zur Verarbeitung und Darstellung dienen.

Einsatzort: Büro (Firmenniederlassung)

Zeitpunkt: nach Projektabschluss

Dokumentation (Bautagebuch)

Die Dokumentation aller Randbedingungen, Vorgänge und Ereignisse (z. B. Wetterbedingungen, Unfälle, Mängel etc.) auf der Baustelle in Bautagebüchern ist essentieller Bestandteil des Bauprojektmanagements. Die mit GADGET.S erfassten und verwalteten Informationen können Basis für deren (teil-) automatisierte Führung sein.

Einsatzorte: Gesamtes Baufeld (Baustelle, Büros, Lean-/Projektsteuerungsraum)

Zyklus: ständig

Öffentlichkeitsinformation

Von Bauprojekten sind neben den direkt an Planung und Bau Beteiligten oft auch weitere Stakeholder direkt – bspw. durch Immissionen – oder indirekt – bspw. bei der Finanzierung öffentlicher Projekte – betroffen. Insbesondere haben Anlieger und bei öffentlichen Projekten die Bürger ein Interesse daran, über das Bauvorhaben, dessen aktuellen Stand und weiteren Ablauf informiert zu sein. Analoge Taktsteuerungstafel können zur Informierung solch externer Personen(-gruppen) nicht genutzt werden, da sie nur lokal zugänglich sind. Die darauf dargestellten Informationen sind zudem zu detailliert und müssen teilweise vertraulich behandelt werden. GADGET.S soll hingegen Informationen zielgerichtet und ortsunabhängig darstellen können. Somit können ausgewählte Informationen (bspw. Bauwerksmodelle, grobe Termine oder Kontaktinformationen) für Externe freigegeben und bereitgestellt werden.

Einsatzorte: beliebig

Zyklus / Zeitpunkt: ständig / nach Bedarf

Schulungen

Wie aus [Verein deutscher Ingenieure, 2019, S. 83] ersichtlich wird, sollte die Methode der Taktplanung und -steuerung in Abhängigkeit der Kenntnisse der beteiligten Personen durch Workshops vermittelt und Qualifizierungsmaßnahmen durchgeführt werden. In den Schulungen kann neben dem Methodischen auch GADGET.S als Werkzeug vorgestellt und der Umgang mit dem System vermittelt werden.

Einsatzorte: Lean-/Projektsteuerungsraum / Schulungsräume

Zeitpunkt: Projektbeginn / beliebig

3.3.4 Anforderungen an eine digital unterstützte Taktsteuerung

Aus den zuvor beschriebenen Anwendungsfällen ergeben sich Anforderungen, die sowohl bei der Entwicklung als auch bei der Anwendung von GADGET.S berücksichtigt werden müssen (vgl. [Leifgen, 2018]). Sie können softwareseitig (s) sein oder die zur Darstellung und Bedienung notwendige Hardware (h) betreffen.

- **Datenquellen (s):** Neben digitalen Bauwerksmodellen müssen weitere Datenquellen so in das System integrierbar sein, dass Informationen und deren Änderungen direkt angezeigt werden können und Daten nicht redundant abgelegt werden müssen.
- **Flexibilität / anwendungsspezifische Darstellung (s):** Das System muss den jeweiligen projektspezifischen Anforderungen (bspw. Zusammensetzung der Beteiligten, eingesetzte Software und Art des Bauvorhabens) entsprechend möglichst individuell anpassbar sein.
- **Einbindung in Projekt (s):** Zur Unterstützung einer digitalen, BIM- sowie LC-basierten Arbeitsweise muss die Integration in die Projektstruktur möglichst aufwandsarm und intuitiv möglich sein. Es müssen weiterhin projektspezifische Vereinbarungen getroffen werden – bspw. in Verträgen und Dokumenten wie dem BAP.
- **Skalierbarkeit von Darstellung und Detaillierung (s):** Um es zu ermöglichen, stets die richtigen Inhalte anzeigen zu lassen, muss deren Darstellung in angemessener Detaillierung und in verschiedenen Zusammenstellungen möglich sein.
- **Zugriffsbeschränkung (s):** Da von verschiedenen Benutzern auf unterschiedliche Datenquellen zugegriffen wird, muss sichergestellt sein, dass diese nur auf die für sie zugänglichen Informationen zugreifen können. Somit müssen Berechtigungen gemäß der Projektanforderungen individuell an die Benutzer vergeben werden können.
- **Verfügbarkeit in verschiedenen Sprachen (s):** Da Personen vieler Nationalitäten auf Baustellen tätig sind, sollen Übersetzungen in deren Landessprachen möglich sein.
- **Benutzerfreundlichkeit (s, h):** Die projektbezogenen Strukturen und Anforderungen unterscheiden sich von Bauvorhaben zu Bauvorhaben. Die Einrichtung wie auch die Bedie-

nung müssen daher möglichst intuitiv sein. Dies betrifft sowohl die softwareseitige Einrichtung des Systems, als auch das je nach Anwendungsfall ggf. notwendige Installieren der Hardware.

- **Inbetriebnahme und Ansprechbarkeit (s, h):** GADGET.S soll ohne tiefgehende IT-Kenntnisse und komplexe Installationsprozesse in Betrieb zu nehmen und benutzbar sein.
- **Vernetztheit, Verteiltheit & Ortsunabhängigkeit (s, h):** Auf GADGET.S soll parallel von verschiedenen Orten und Benutzern zugegriffen werden können. Das System muss daher hardwareseitig vernetzbar sein. Softwareseitig muss es für einen verteilten Mehrbenutzerbetrieb ausgelegt werden.
- **Skalierbarkeit (h):** Der Betrieb des Systems soll auf Baustellen verschiedener Größen möglich sein. Die Anzahl der genutzten Endgeräte muss daher frei gewählt werden können.
- **Geräteunabhängigkeit (h):** In Abhängigkeit des Anwendungsfalles muss GADGET.S auf verschiedenen Endgeräten darstellbar sein. Auch müssen geeignete Geräte zur Datenaufnahme verschiedener Informationsbereiche integrierbar sein.
- **Mobilität (h):** Da GADGET.S am Ort der Wertschöpfung eingesetzt werden soll, muss es mit fortschreitendem Bauablauf mit den Bauabschnitten und Geschossen mitwandern können. Dazu muss Hardware genutzt werden können, die möglichst leicht transportierbar und mit einfacher Infrastruktur vernetzbar ist.
- **Baustellentauglichkeit (h):** Der Haupteinsatzort von GADGET.S im Rahmen der Taktsteuerung ist das Baufeld. Insbesondere die auf der Baustelle eingesetzten Hardwaresysteme müssen daher physisch robust sein.

3.3.5 Funktionalitäten und Systemeigenschaften

Aus den Anwendungsfällen und den daraus abgeleiteten Anforderungen ergeben sich Funktionalitäten und Systemeigenschaften, die in dem Konzept von GADGET.S aufgegriffen werden:

- **Modularität:** Das System ist modular aufgebaut, sodass es aus einzelnen Bausteinen zusammengestellt werden kann.
- **Detaillierungsgrade:** Die darzustellenden Inhalte können in verschiedenen Detaillierungsgraden dargestellt werden.
- **Interaktivität:** Die Bausteine sind untereinander verknüpft und interaktiv, d. h. sie reagieren kontextbezogen auf Benutzereingaben oder einander.
- **Automatisierung:** Ereignisse/Funktionen können automatisiert ausgelöst/ausgeführt werden.

- **Aktualität:** Es wird stets der aktuelle Stand der hinterlegten Inhalte dargestellt, da das System die aktuelle Datenbasis wiedergibt.
- **Layouts & Templates:** Die Inhalte können frei angeordnet und individuell miteinander zu Layouts kombiniert werden. Diese können als Vorlagen (Templates) – bspw. für verschiedene Vertragsmodelle oder Bauprojekttypen – gespeichert werden.
- **Austauschen von Inhalten:** Benutzer können Ansichten (Snapshots) von GADGET.S oder einzelner Bausteine auf andere Geräte übertragen.
- **Mehrsprachigkeit:** Inhalte sind in verschiedenen Sprachen darstellbar. Zwischen diesen kann – bspw. personenbezogen – gewechselt werden.
- **Benutzer:** Benutzer werden Gruppen, Rollen und Unternehmen zugeordnet. Zudem können personenbezogene Daten hinterlegt werden.
- **Identifikation:** Benutzer können sich am System identifizieren.
- **Zugriffsberechtigungen:** Der Zugriff auf das gesamte System ist an Benutzer und Benutzergruppen gebunden und einschränkbar.
- **Bedienung & Dateneingabe:** Bedienung, Datenerfassung und -manipulation können über Eingabegeräte (Maus, Tastatur, Touchscreen), direkt auf mobilen Endgeräten sowie ggf. über Spracheingaben und -befehle erfolgen.
- **Externe Datenquellen:** Die Anbindung externer Datenquellen und Integration in CDEs wird ermöglicht.
- **Verteiltheit:** Das System ist nicht ortsgebunden, sondern kann von räumlich verteilten Endgeräten aus genutzt werden.
- **Plattformunabhängigkeit:** Das System kann unabhängig von Betriebssystem und Endgerätetyp aufgerufen werden.

3.3.6 Abgrenzung zu bestehenden Ansätzen und Softwarelösungen

In 3.2.3 werden Softwarelösungen vorgestellt, die Teilbereiche aus dem Kontext der LC-basierten Baustellensteuerung, Taktplanung oder -steuerung abdecken⁵. Wie in 3.3 beschrieben, existiert jedoch kein ganzheitlicher Ansatz, der eine integrierte, bauwerksbasierte, (teil-) automatisierte und vollständig digitale Unterstützung dieser Methode ermöglicht. Keine der betrachteten Anwendungen stellt über die Prozessplanung und -steuerung hinausgehende Funktionalitäten zur Taktsteuerung, wie etwa Bewertungen des Baustellenstatus, (bauwerksbezogene) Visualisierungen der Taktplanung oder Darstellungen weiterführender Informationsbereiche bereit. Somit erfolgt ebenso wenig eine vollständige Verknüpfung aller Informationsbereiche un-

⁵ Anmerkung: Nicht öffentliche, in Entwicklung befindliche und firmeninterne Lösungen werden nicht berücksichtigt.

tereinander, sodass der daraus theoretisch generierbare Mehrwert nicht genutzt werden kann. In Tabelle 3-2 und Tabelle 3-3 werden diese Lösungen zusammenfassend mit den in GADGET konzeptionierten Funktionen hinsichtlich der beschriebenen Anwendungsfälle und den dargelegten Funktionalitäten verglichen⁶.

Tabelle 3-2: Vergleich der Anwendungsfälle von GADGET mit bestehenden Softwarelösungen, : unterstützt, : teilweise unterstützt, : nicht unterstützt, Erläuterungen A-J: siehe unten

	GADGET	Software A	Software B	Software C	Software D
Taktplanung		 A	 A	 A	 A
Taktsteuerung		 B, J	 J	 B, J	 B, J
tägliche Taktbesprechung		 B, J		 B, J	
wöchentliche Taktbesprechung		 B, J		 B, J	
Informationsbasis					
Informationserfassung		 C	 C	 C	 C
Berichterstattung		 B	 D	 B	 B
Nachkalkulation		 D	 D	 D	 D
Dokumentation		 D	 D	 D	 D
Öffentlichkeitsarbeit					

Erläuterungen zu Tabelle 3-2 und Tabelle 3-3:

- **A:** Manuelle Planung
- **B:** Projektstatus kann anhand PPC-Kennzahl nachverfolgt werden
- **C:** Aufgaben können erfasst und als erledigt markiert werden
- **D:** Manuell, nicht innerhalb eines Systems möglich
- **E:** Auf mobilen Endgeräten können Aufgaben bearbeitet werden
- **F:** Anmeldung über Eingabe von Benutzername und Passwort
- **G:** Eingeschränkt möglich
- **H:** Eingabe mittels Maus und Tastatur

⁶ Die Bezeichnungen der Anwendungen wurden anonymisiert. Eine Aufschlüsselung kann bei dem Autor angefragt werden.

- I: System dient der Planung und Steuerung
- J: Umfang: Prozesse / Aktivitäten

Tabelle 3-3: Vergleich der Funktionalitäten von GADGET mit bestehenden Softwarelösungen, : vorhanden, : teilweise vorhanden, : nicht vorhanden, Erläuterungen A-J: siehe oben

	GADGET	Software A	Software B	Software C	Software D
Taktplanung					
(Teil-) Automatisierte Taktplanung					
Direkte Einbindung von Projektressourcen					
Direkte Einbindung von Aufwandswerten					
Modellbasiert		 D			
Automatisierte Plausibilitätsprüfungen					
Verknüpfung zu (Takt-) Steuerung		 I	 I	 I	 I
(Takt-) Steuerung					
Detaillierungsgrade					
Interaktivität		 F			
Automatisierung			 G		 H
Aktualität					
Modularität (Layouts & Templates)					
Austauschen von Inhalten					
Mehrsprachigkeit					
Benutzer(management)					
Identifikation(stechnologien)		 F	 F	 F	 F
Zugriffsberechtigungen		 G	 G	 G	 H
Interaktive Bedienung & Dateneingabe		 H	 H	 H	 H
Anbindung externer Datenquellen					
Verteiltheit					
Plattformunabhängigkeit					

4 Gemeinsame Anwendung von BIM-Methodik und Lean Construction

Als Grundlage zur Betrachtung des Konzeptes einer digitalen und BIM-basierten Taktplanung und Taktsteuerung wird in den folgenden Abschnitten zunächst allgemein erläutert, wie LC und die BIM-Methodik in den übergeordneten Kontext der digitalen Transformation in Unternehmen eingeordnet werden können. In einer Übersicht wird dargestellt, welche Überschneidungen zwischen ihnen bestehen und darauf eingegangen, dass durch eine gemeinsame Anwendung Synergien entstehen können, die zu Effizienz- und Produktivitätssteigerungen führen können. Im Anschluss daran wird beschrieben, dass Daten, Informationen und das daraus gewonnene Wissen als Basis zur Anwendung beider Ansätze dienen und darauf aufbauende digital durchgeführte Arbeitsweisen zu Automatisierungen von Abläufen beitragen können.

4.1 Digitale Transformation, BIM-Methodik und Lean Construction in der Wertschöpfungskette Bau

Die digitale Transformation umfasst einerseits neue, innovative Arbeitsweisen, Methoden und Werkzeuge, sie kann aber auch großen Einfluss auf bestehende haben. Ein Beispiel dafür ist die LC, die von dem digitalen Vorliegen von Daten stark profitieren kann. Viele ihrer Methoden und Werkzeuge basieren auf dem detaillierten Erfassen, Verarbeiten und Auswerten großer Datensmengen – mit einem Schwerpunkt in Bauwerks- und Prozessdaten. Je höher deren Digitalisierungsgrad ist, umso effizienter und genauer können diese Vorgänge durchgeführt werden. Ein wesentlicher Aspekt einer gesamtheitlichen Anwendung von LC – wie auch der BIM-Methodik –, der dadurch gefördert werden kann, ist das transparente Zusammenarbeiten aller Beteiligten.

In Abbildung 4-1 wird die digitale Transformation¹ im Bauwesen unter Anwendung von LC und der BIM-Methodik eingeordnet. Die Basis zur Schaffung einer ganzheitlichen digitalen Wertschöpfungskette im Bauwesen stellt das digitale Vorliegen von Daten dar. Die daraus abgeleiteten Informationen können computerbasiert interpretiert werden. Somit kann im Gegensatz zu einer analogen, manuellen Vorgehensweise zusätzliches Wissen generiert und Abläufe automatisiert werden. Eine wesentliche Grundlage dazu ist die Sicherstellung eines durchgängigen Datenflusses. Dieser sollte sowohl zwischen einzelnen Softwaresystemen (möglichst bidirektional und ohne Einschränkungen) sowie über den gesamten Projektverlauf hinweg sichergestellt werden.

¹ Mit dem Begriff der digitalen Transformation ist im Rahmen dieser Dissertation die digitale Transformation auf Unternehmensebene zu verstehen (vgl. 2.1.2).

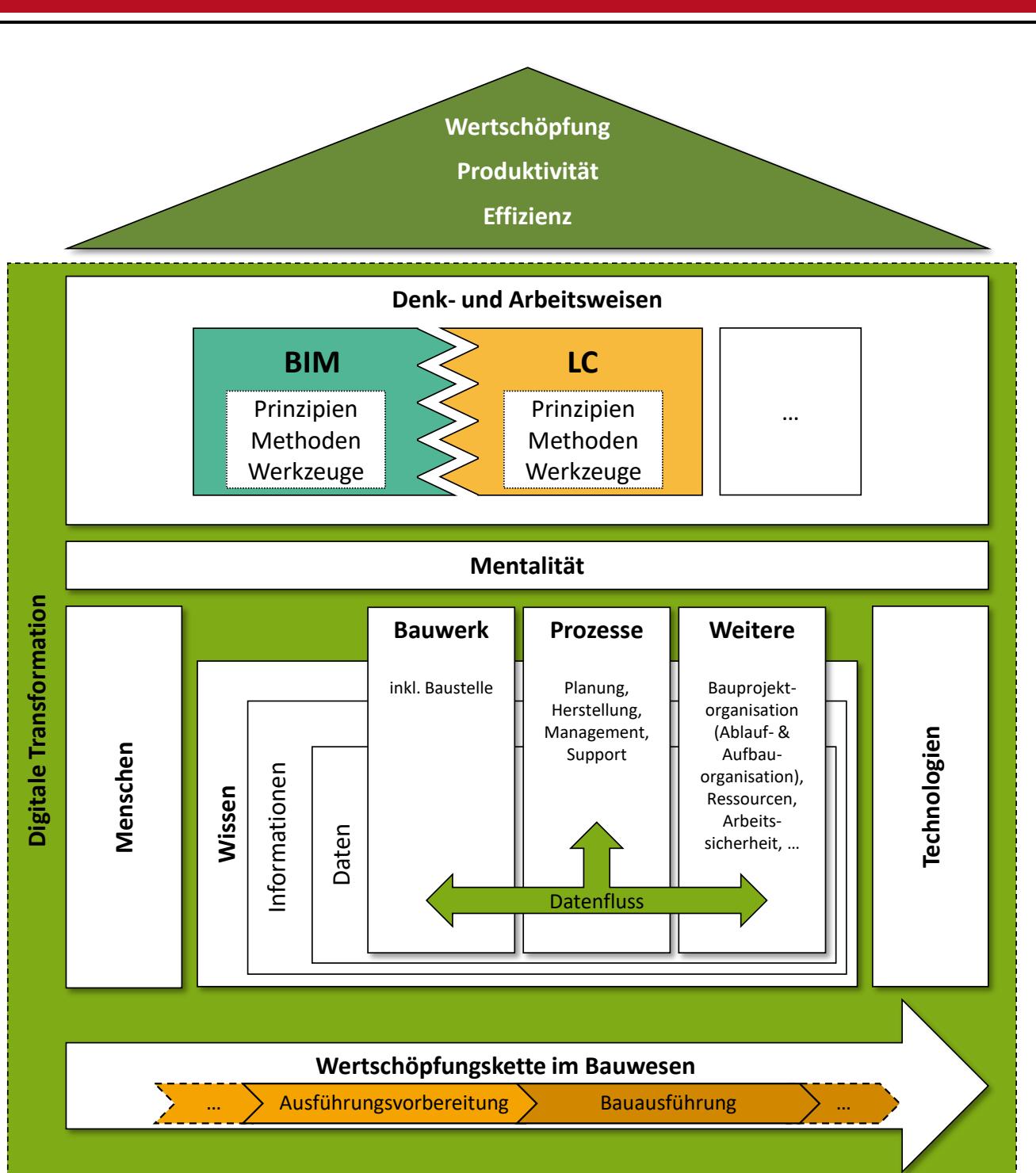


Abbildung 4-1: Einordnung der digitalen Transformation der Wertschöpfungskette Bau unter Anwendung von BIM-Methodik und LC (Eigene Darstellung)

Aufbauend auf dem digitalen Wissen über Bauwerk, Prozesse und weitere Bereiche, wie bspw. Projektablauf- und aufbaustrukturen, sowie digitalen Technologien und unter Einbeziehung der Menschen, die das Arbeiten in digitalen Umgebungen akzeptieren und fördern, können neue Denk- und Arbeitsweisen eingeführt und bestehende unterstützt werden. Das Hauptaugenmerk liegt im Weiteren auf dem Bauwerk sowie der Baustelle und den zur Herstellung notwendigen

Planungs-, Überwachungs- und Steuerungsprozessen im Rahmen der Bauausführung und deren Vorbereitung. Aber auch alle anderen Phasen der Wertschöpfungskette, beginnend bei der Projektplanung über die Nutzung bis zur Umnutzung und dem Rückbau, sind grundsätzlich in diesen Aufbau einzuordnen.

Einordnung in Unternehmen

Den Kern der unternehmerischen Tätigkeit bilden die Leistungserstellungsprozesse. In diesen werden die wertschöpfenden Tätigkeiten durchgeführt. Bei Bauunternehmen sind dies nach erfolgreicher Akquisition die Prozesse in der Bauausführung und deren Planung. Die digitale Transformation erstreckt sich über diese hinaus auf alle Unternehmensbereiche, -ebenen und -prozesse. Dabei stehen insbesondere die Anwendung der BIM-Methodik und der Einsatz digitaler Technologien im Mittelpunkt. Eine ganzheitliche Implementierung der Lean-Philosophie erfordert analog dazu die Einführung und Anwendung von Methoden, Prinzipien und Werkzeuge über das gesamte Unternehmen hinweg. In Abbildung 4-2 ist dies dargestellt. Zudem wird veranschaulicht, dass die Anwendung von Lean Construction auf den durch die digitale Transformation geschaffenen Grundlagen aufbauen kann, sodass LC-Methoden und -Werkzeuge digital unterstützt und weiterentwickelt werden können. Ebenso kann umgekehrt die digitale Transformation durch die Beachtung von Lean-Ansätzen effizienter und zielführender gestaltet werden.

Gemeinsamkeiten und Synergien zwischen LC und BIM

LC und die BIM-Methodik sind zwei voneinander unabhängige, kollaborative Ansätze. Beide umfassen spezifische Ziele, Denkweisen, Prinzipien und Anforderungen an ihre Einführung in Unternehmen. Ihre Anwendung erfordert jeweils eigene, zielgerichtete Werkzeuge und Strategien. Jedoch stehen sie sich nicht entgegen oder schließen sich aus. Vielmehr gibt es zwischen ihnen Überschneidungen auf vielen Ebenen. Neben inhaltlichen Gemeinsamkeiten bei der Einführung und Anwendung in Unternehmen und über alle Projektphasen hinweg treten in der Praxis aber auch Hindernisse auf, die eine flächendeckende Verbreitung hemmen. In Abbildung 4-3 sind Beispiele für solche Überschneidungen zusammengestellt. Bereiche, die für die vorliegende Arbeit von besonderer Bedeutung sind, sind hervorgehoben. [BMVI, 2015; Verein deutscher Ingenieure, 2019]

Werden LC und BIM gemeinsam angewandt, so kann dies darüber hinaus zu Synergieeffekten auf allen Ebenen führen. Insbesondere bei der Betrachtung der Prinzipien und Werkzeuge beider Ansätze lassen sich große gegenseitige Beeinflussungen und Unterstützungen feststellen, die effizienzsteigernd genutzt werden können. Hervorzuheben ist die Bereitstellung einer breiten und tiefgehenden Menge an Daten resp. Informationen. Viele LC-Prinzipien profitieren von

einer modellbasierten Speicherung, einer Anreicherung des Bauwerksmodells mit weiterführenden Informationen sowie der Verknüpfung des Modells mit anderen Informationsbereichen, wie Prozessen oder Kosten. [Sacks u. a., 2010, S. 968-980], [Kröger, 2018, S. 70-81], [Berner u. a., 2016, S. 466-472]

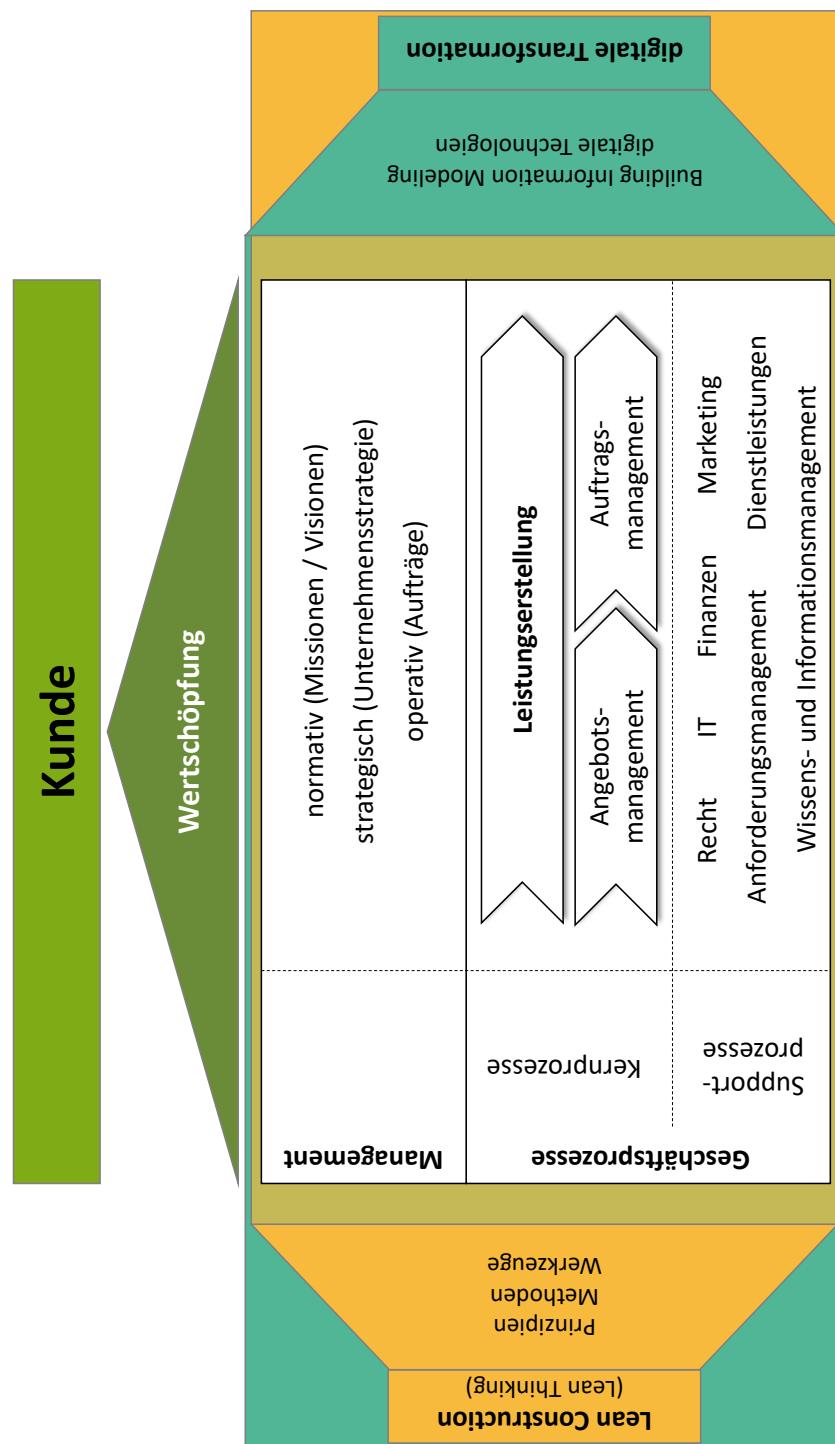


Abbildung 4-2: Einordnung von digitaler Transformation, BIM-Methodik und LC in Unternehmen (Eigene Darstellung, in Anlehnung an [Girmscheid u. Motzko, 2013, S. 6] und [Verein deutscher Ingenieure, 2019, S. 7])

Überschneidungen		Building Information Modeling		
Lean Construction				
Kundenzufriedenheit erhöhen, Wertschöpfung maximieren, stetige Verbesserung , Projektfolg, Planungs- & Bauprozesse gestalten & optimieren, Verschwendungsreduzierung	<u>Wertschöpfungssteigerung</u> <u>Produktivitätssteigerung</u> <u>Effizienzsteigerung</u>	Erhöhung von Planungsgenauigkeit und Kostensicherheit, Optimierung der Kosten im Lebenszyklus, Minimierung von Planungsfehlern, Risiken, unerwarteten Kostensteigerungen, gestörten Bauabläufen und unnötig hohen Betriebskosten	Ziele	
Ausrichtung auf den Kunden, kontinuierliche Verbesserung, Standardisierung, visuelles Management, Just-In-Time, Fließ-, Takt-, Zieh-, Null-Fehler-Prinzip	<u>ganzheitlich, kollaborativ, kooperativ, gemeinschaftlich, ehrlich, transparent</u> , nachhaltig	<u>modellbasiertes Arbeiten, Verknüpfung von Modellen mit weiteren Informationen</u> (Kosten, Prozesse, ...)	Denkweisen & Prinzipien	
Neue Führungskultur, Faktor „Mensch“ stärker beachten, offene Fehlerkultur		Prozesse auf <u>modellbasierte Arbeitsweise</u> anpassen	Unternehmen normatives & strategisches Management	
Last Planner System®, Taktung der Baustelle (Taktsteuerungstafel) , Taktbesprechungen etc., Kanban, Projektsteuerungsraum u. v. m.	Nutzung von <u>Werkzeugen</u> , Einführung neuer <u>Prozesse</u> , Beachtung von Normen und Richtlinien, Vereinbarung partnerschaftlicher Verträge	<u>BIM-Software</u> (Modellierung, Überprüfung, Datenaustausch etc.), BIM-Dokumente (AIA, <u>BAP</u> etc.) u. v. m.	Anwendung	
Projektvorbereitung Projektplanung Ausführungsvorbereitung	Ausführung Bauausführung	Projektabchluss Objektbetreuung	Projekt	
				Hemmnisse
Gesetze, Normen, Projektentwicklungs- / Vergütungs- / Geschäftsmodelle, Fragmentierung von Wertschöpfungsketten & Unternehmenslandschaft				

Abbildung 4-3: Überschneidungen von LC und BIM-Methodik, **hervorgehobene** Punkte sind für diese Arbeit von besonderer Bedeutung (Eigene Darstellung)

[Sommer, 2016, S. 234-235] sieht durch die Anwendung von BIM zur Unterstützung der Lean Management basierten Planung und Ausführung von Bauprojekten Vorteile in der Verknüpfung von Bauwerksmodellen – in denen Bauteile über ihre geometrischen und semantischen Eigenschaften, ihre Positionen im Modell und ihre topologischen Abhängigkeiten klar definiert sind – mit Prozessen und Kosten. So können Ablaufsimulationen durchgeführt, Transportwege bestimmt und somit die LC-basierte Baustellensteuerung unterstützt werden. Auch wird eine gegenseitige Unterstützung beider Ansätze hervorgehoben. Durch die Anwendung der BIM-Methodik wird die Informationsqualität erhöht und somit die Anwendung von LC erleichtert. Ebenso fördert eine LC-basierte Arbeitsweise die Anwendung der BIM-Methodik auf der Baustelle, da die dadurch verfügbaren Daten vielfältig eingesetzt werden können.

4.2 Daten, Informationen und Wissen als Basis einer digitalen, BIM-basierten Lean Construction

Die Anwendung der BIM-Methodik und von Methoden und Werkzeugen aus der LC, wie Taktplanung und -steuerung, geht mit der Aufnahme, Speicherung, Verarbeitung, Auswertung und Darstellung einer großen Menge heterogener Daten und Informationen sowie des durch deren Verknüpfung und Interpretation abgeleiteten Wissens einher (vgl. 2.1.3). Ihre Heterogenität ist dabei sowohl inhaltlichen, als auch technischen (insb. Datenformate, benötigte Software) Ursprungs. Überdies bestehen komplexe Abhängigkeiten unter ihnen. Viele der Informationen haben einen direkten oder indirekten Bezug zu dem herzustellenden Bauwerk und dessen Umgebung. Im Folgenden wird ein Überblick über die in Abbildung 4-4 dargestellten, LC- und BIM-relevanten Informations- resp. Wissensbereiche im Kontext dieser Dissertation gegeben.

Prozesse

Essentiell zur Organisation eines Projektes ist das Definieren von Prozessen im Rahmen der Ablauforganisation. Dadurch werden die Arbeiten in eine sachlogische, räumliche sowie zeitliche Abfolge gebracht. Sie bilden sowohl für die Anwendung der LC-Methoden und -Werkzeuge sowie zur erfolgreichen Implementierung der BIM-Methodik eine entscheidende Grundlage. Sie müssen daher – in einem dem Anwendungsfall entsprechenden Detaillierungsgrad – erfasst und exakt ausgeführt werden.

Eine Möglichkeit zur Gliederung von Prozessen ist nach [Girmscheid, 2014, S. 12] die Unterteilung in Management- und Geschäftsprozesse, welche wiederum aus Kern- und Supportprozessen bestehen. Für die in dieser Dissertation betrachtete Anwendung des Taktungsansatzes und der dazugehörigen Werkzeuge sind insbesondere die Kern- bzw. Leistungserstellungsprozesse sowie einige Supportprozesse in der Ausführungsvorbereitungs- und der Ausführungsphase in diesen Bereichen von Interesse:

- Herstellung
- Baustellensteuerung
- Logistik
- Building Information Modeling
- Kommunikation & Datenaustausch
- Wissensmanagement
- IT

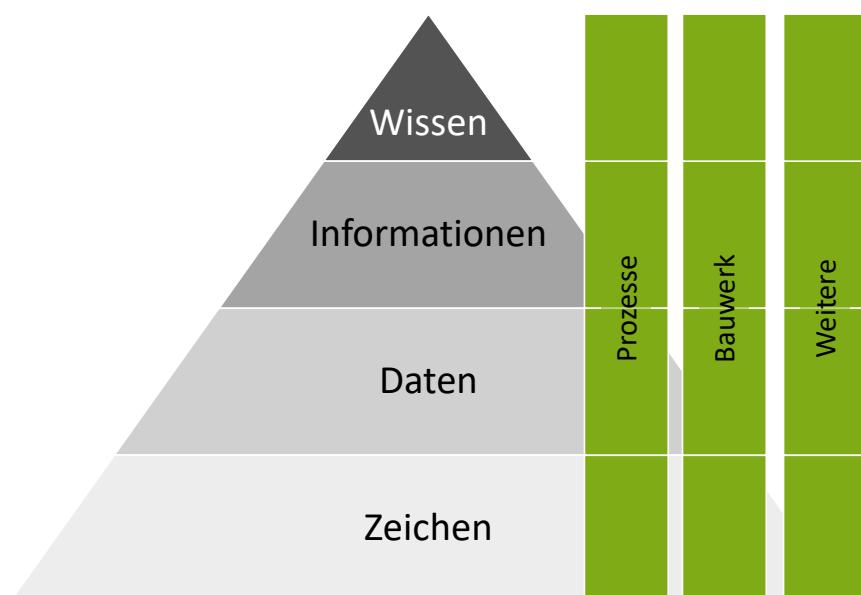


Abbildung 4-4: Informations- resp. Wissensbereiche als Basis für die Anwendung von LC und BIM-Methodik (Eigene Darstellung)

Die Durchführung der Herstellungsprozesse basiert bei einer getakteten Baustelle auf der Einteilung der Arbeiten in Arbeitspakete, die in Taktplänen strukturiert und von den ausführenden Gewerken während der Takte abgearbeitet werden. Dadurch wird den Herstellungsprozessen ein zeitlicher Kontext gegeben. Gemeinsam mit der Zuordnung der Arbeitsinhalte, die durch örtliche Festlegungen und die herzustellenden Bauteile definiert werden, wird somit der Bauablauf beschrieben. Neben dieser mit Detail- oder Steuerungsterminplänen vergleichbaren Detailierungsstufe werden übergeordnete Rahmenterminpläne benötigt, in denen u. a. Meilensteine und Fristen festgehalten werden. Wichtige Elemente der Bauablaufplanung sind somit:

- Arbeitspakete
- Taktpläne
- Terminpläne

Bauwerk

Das Bauwerk stellt das zentrale Element eines jeden Bauprojektes dar. Alle Informationen stehen direkt oder indirekt mit ihm in Verbindung. Bei Anwendung der BIM-Methodik wird es digital abgebildet. Die hinterlegten Informationen beschreiben seine geometrischen und semantischen Eigenschaften. Weiterhin kann dahingehend differenziert werden, ob Informationen das Bauwerk selbst (bspw. Bauteile) beschreiben, zur Unterstützung während der Planung und Herstellung dienen (bspw. Pläne, Annotationen) oder mit Bauwerkselementen verknüpft sind (bspw. mit Bauteilen verknüpfte Prozesse, Ressourcen oder Leistungspositionen). Hervorzuheben sind Informationen über:

- Bauteile
- Gebäudeausrüstungselemente
- Baustelleneinrichtungselemente
- Logistikelemente
- Flächen
- Ansichten, Pläne, Annotationen

In digitalen Bauwerksmodellen zu hinterlegende, bauwerksbezogene Inhalte ergeben sich im Rahmen der Taktung der Baustelle insb. bei der geometrischen Einteilung des Bauwerks auf Grundlage der Bauteile:

- Funktionscluster
- Taktabschnitte
- Taktbereiche

Weitere Informationen

Informationen, die sich aus der Taktung der Baustelle ergeben und nicht direkt den Bereichen der Prozesse oder des Bauwerks zuzuordnen sind, sind:

- Bewertungen
 - Wertschöpfung
 - Leistung
 - Qualität
 - Termintreue
 - Ordnung
 - Sauberkeit

– Arbeitssicherheit

- Kennzahlen
- Maßnahmen

Einen weiteren wichtigen Informationsbereich stellt die Aufbauorganisation dar. Sie definiert das Zusammenwirken der Beteiligten in Projekten. Inhalte in diesem Kontext sind:

- Aufgaben
- Rollen
- Beteiligte
- Zuständigkeiten
- Kommunikationstrukturen
- Vertragsstrukturen

Darüber hinaus fallen in Projekten Informationen an, die bei der Anwendung von LC und der BIM-Methodik Relevanz haben:

- Ressourcen (vor allem Arbeitskräfte und Geräte)
- Allgemeine Baustelleninformationen (Projektinformationen, Baustellenversorgung)
- Arbeitssicherheit (Montageanweisungen, Gefährdungsbeurteilungen, Sicherheits- und Gesundheitsschutzpläne)

Abhängigkeiten und Verknüpfung von Wissen

Zwischen den Inhalten der beschriebenen Bereiche besteht eine Vielzahl an Abhängigkeiten, sodass an vielen Stellen Informationen miteinander verknüpft werden müssen, um zielführend ausgewertet werden zu können. Die im Rahmen der LC- und taktbasierten Baustellensteuerung wichtigsten Verknüpfungen bestehen zwischen dem Bauwerk, seinen Herstellungsprozessen und den dazu notwendigen Ressourcen: Die Herstellungsprozesse werden dabei gewerkeweise in Arbeitspaketen mit den Ressourcen sowie einem räumlichen (Herstellungsort) und ablauftechnischen resp. zeitlichen (Takte, Termine) Kontext verknüpft. Durch Anbindung weiterer Informationen, wie Leistungspositionen kann zusätzliches Wissen, wie bspw. Kostenverläufe, abgeleitet werden.

Tabelle 4-1 zeigt ein Beispiel für die verschiedenen Stufen von Daten über Informationen zu Wissen sowie für eine Verknüpfung des Wissens aus mehreren Bereichen.

Tabelle 4-1: Beispiel für Daten, Informationen und Wissen

	Bauwerk	Prozesse	Ressourcen
Daten	2	0,5	5
Information	Volumen: 2 m ³	Aufwandswert: 0,5 Ah/m ³	Anzahl Arbeitskräfte: 5 AK
Wissen	Das Volumen der Wand beträgt 2 m ³ .	Der Aufwand zur Herstellung einer Wand beträgt 0,5 Ah/m ³ .	In einer Kolonne arbeiten 5 Arbeitskräfte [Ah/h].
Verknüpftes Wissen	Die Herstellung der Wand wird mit einer Kolonne 2 m ³ / (5 Ah/h / 0,5 Ah/m ³) Stunden dauern.		

4.3 Automatisierung und digitale Arbeitsweisen

Die in der Informatik üblicherweise getrennten Funktionsbereiche der Datenhaltungs-, Datenverarbeitungs- und Darstellungsschicht von Software finden sich auch im allgemeinen Umgang mit Daten wieder. Unabhängig davon, ob ein analoges, digitales, manuelles oder automatisiertes System genutzt wird, müssen Daten erfasst und gespeichert werden, um darauf aufbauend verarbeitet und ausgewertet werden zu können. Um mit den abgeleiteten Informationen arbeiten zu können, müssen diese abschließend in von Menschen interpretierbarer Form dargestellt werden. Diese Schritte sind unabhängig von der Art der Daten notwendig. Jedoch können sich die Arbeitsweisen und Werkzeuge zu ihrer Durchführung stark unterscheiden.

LC im Allgemeinen und die Anwendung des Taktungsansatzes im Speziellen erfordern das Arbeiten mit großen und komplexen Datenmengen. Dasselbe gilt für die im BIM-Kontext anfallenden Inhalte. Ein Ziel in der Projektabwicklung ist es daher, möglichst viele Arbeitsschritte zu automatisieren, um einerseits den Arbeitsaufwand für Menschen zu reduzieren und andererseits die Qualität der Prozesse und Inhalte zu erhöhen, indem größere und genauere Datenmengen erhoben und verarbeitet und Fehlerwahrscheinlichkeiten gesenkt werden sowie durch bessere Auswertungsmöglichkeiten zusätzliches Wissen generiert wird. Durch die über eine reine Digitalisierung hinausgehende digitale Transformation der Arbeitsweisen unter Einbeziehung neuer digitaler Technologien und einer stärkeren Verknüpfung von Informationen resp. Wissen kann dies erreicht werden. Um dies zu verdeutlichen, werden nachfolgend drei Stufen von einer analog/manuellen bis zu einer digital/automatisierten Arbeitsweise beschrieben.

Analoge, manuelle Arbeitsweise

Liegen Daten nicht digital vor, so müssen alle Schritte vom Erfassen über die Verarbeitung und Auswertung bis zur Darstellung manuell von Menschen durchgeführt werden. Ein Beispiel dafür

ist das Erfassen von Notizen mit Stift und Papier. Dabei dient das Papier sowohl der Datenhaltung, als auch der Darstellung. Die Verarbeitung und Interpretation der festgehaltenen Informationen erfolgt manuell im menschlichen Kopf. Die festgehaltenen Informationen können so zwar genutzt werden, jedoch ermöglichen sie keine weitere nicht-manuelle Verarbeitung oder Verknüpfung ohne eine Überführung und Interpretation in digitale(n) Systeme(n).

Analog/digitale, manuelle Arbeitsweise

Seit vielen Jahren ist es eine gängige Arbeitsweise, mit digitalen Systemen zu arbeiten. Daten werden in ihnen erstellt, gespeichert, verändert und dargestellt. Viele Arbeitsschritte werden manuell durch Benutzerinteraktionen ausgeführt. Dabei kommt es häufig zu Medienbrüchen, wenn Informationen aus digitalen Systemen heraus in Papierform weitergegeben oder archiviert werden. Auch werden viele Informationen zunächst manuell erfasst und im Nachgang digitalisiert, da passende Werkzeuge zu einer digitalen Datenaufnahme fehlen oder nicht eingesetzt werden.

Digitale, automatisierte Arbeitsweise

Wird hingegen vollständig in digitalen Systemen gearbeitet, können durch die Nutzung digitaler Technologien, bspw. zur Datenaufnahme, Prozesse durch eine (Teil-)Automatisierung verschlankt werden². Werden Informationen verschiedener Wissensbereiche darüber hinaus untereinander verknüpft, so wird es möglich, Prozesse weiter zu automatisieren und somit effizienter abzuwickeln. Dazu können auch Zusammenhänge und Abhängigkeiten der Informationen untereinander genutzt werden, die bei einer manuellen Arbeitsweise nicht ersichtlich würden oder aufwändig hergeleitet werden müssten.

Eine vollständig digitale, in weiten Teilen automatisierte Arbeitsweise kann zu Verbesserungen auf allen Ebenen führen: Die Datenhaltung und -verarbeitung sowie die kontextbezogen passende Visualisierung können ohne Eingriff des Anwenders erfolgen. Dies ermöglicht es ihm, den Fokus auf die Ebene des Wissens zu legen, sich also den eigentlichen Arbeitsinhalten zu widmen. Durch den Wegfall manuell durchgeführter Prozesse wird überdies die Fehlerwahrscheinlichkeit reduziert. Werden Daten direkt aus einer zentralen, digitalen Datenhaltung (CDE) abgefragt und digital bearbeitet, entfällt der Austausch von Dokumenten in Papierform oder digitaler Kopien. So kann stets auf dem aktuellen Datenstand gearbeitet werden. Auch das nachträgliche Überführen analoger Informationen in digitale Systeme entfällt. Somit kann dies im Nachgang nicht vergessen werden und keine Fehler bei Übertragungsvorgängen gemacht werden.

² Es ist zu beachten, dass nicht automatisch und in jedem Fall Verbesserungen eintreten. Findet der Einsatz digitaler Technologien nicht zielgerichtet statt oder werden Bedürfnisse der Menschen nicht beachtet, so kann dies auch negative Auswirkungen haben.



5 Konzept einer ganzheitlichen digitalen erweiterten Taktplanung und Taktsteuerung

Aufbauend auf der in Kapitel 3 beschriebenen Analyse des aktuellen Standes und bisher üblicher Arbeitsweisen in der Taktplanung und -steuerung wurden Anwendergruppen, Anwendungsfälle, Anforderungen und Funktionalitäten an ein System zur digitalen Unterstützung und Erweiterung der Taktsteuerung ermittelt. In diesem Kapitel wird ein Konzept vorgestellt, das diese Anforderungen aufgreift und die identifizierten Funktionalitäten umsetzt. Dazu werden digitale Methoden und Technologien genutzt und eine Integration in die BIM-Methodik vollzogen. Das vorgestellte Gesamtkonzept wird als GAnzheitliche DiGitale Erweiterte Taktung (GADGET) bezeichnet. Es umfasst zwei Anwendungen, die Werkzeuge zur Unterstützung dieser beiden Aufgabenbereiche darstellen (s. Abbildung 5-1).

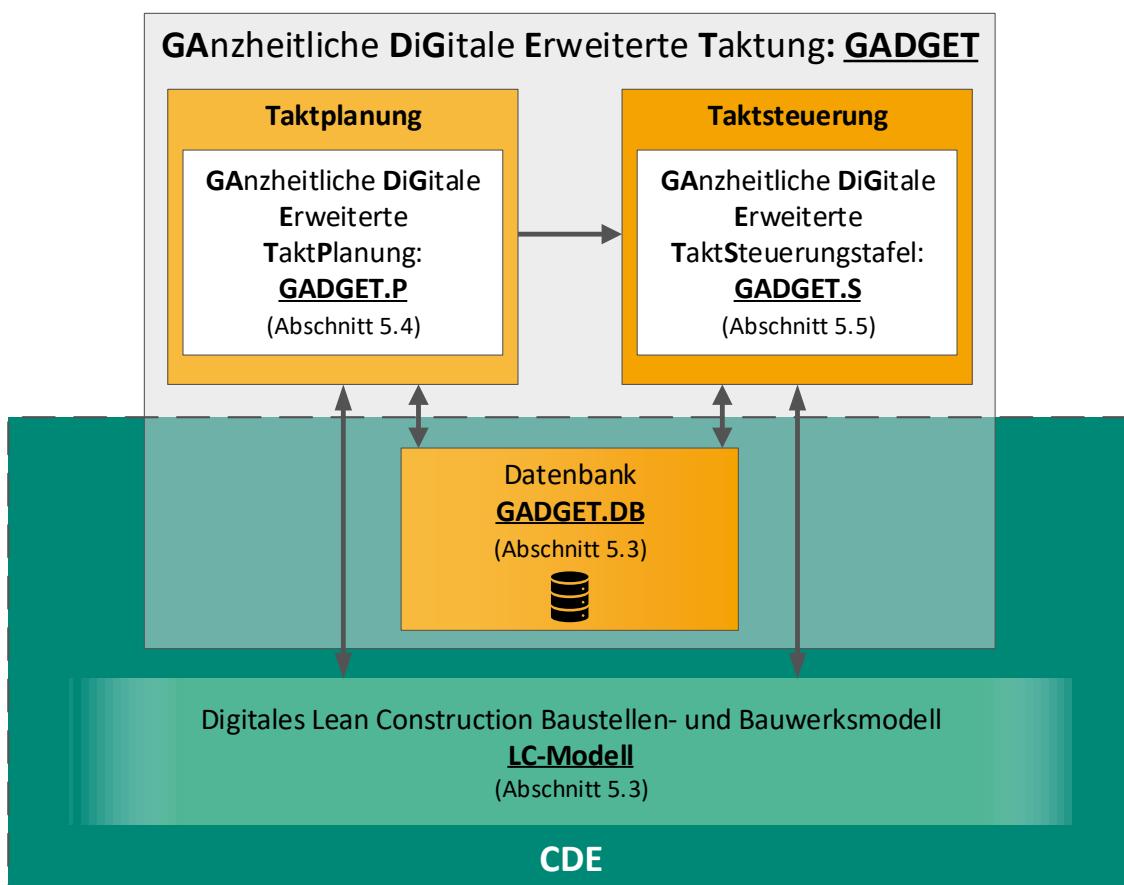


Abbildung 5-1: Übersicht der Konzeptbestandteile von GADGET (Eigene Darstellung)

In 5.4 wird mit GADGET.P ein Ansatz zur ganzheitlichen digitalen erweiterten Taktplanung vorgestellt, während in 5.5 erläutert wird, wie mit GADGET.S ein ganzheitliches digitales System zur Unterstützung der Taktsteuerung gestaltet werden kann. Die in 5.3 vorgestellte gemeinsame Datenbasis beider Anwendungen bilden eine Datenbank, die GADGET.DB, in der alle nicht bauwerksbezogenen Informationen der Taktung hinterlegt werden, sowie ein digitales Lean Construction Baustellen- und Bauwerksmodell, das sog. LC-Modell, in welchem alle LC-relevanten Baustellen- und Bauwerksinformationen verwaltet werden.

Diese Strukturierung erlaubt einen durchgängigen Datenfluss zwischen den Anwendungen über alle Projektphasen hinweg. Dieser wird zudem durch die mittels Schnittstellen ermöglichte, webbasierte Integration von GADGET in ein CDE unterstützt. Sowohl das LC-Modell, als auch die GADGET.DB werden darin abgelegt. Durch die Anbindung an das CDE wird auch eine direkte Verknüpfung mit weiteren Datenquellen und Softwaresystemen möglich.

Im Folgenden werden die Bestandteile des Konzeptes zunächst in die relevanten Bauprojektphasen eingeordnet. Daran anknüpfend erfolgt die Erläuterung der bei der Konzeptionierung getroffenen Annahmen sowie die Vorstellung der GADGET.DB und des LC-Modells.

5.1 Einordnung in den Projektkontext

Voraussetzung und Grundlage zu der Anwendung von GADGET.P, GADGET.S sowie des LC-Modells ist die Vereinbarung einer digitalen, modellbasierten Arbeitsweise, die auftraggeberseitig in den Auftraggeber Informationsanforderungen (AIA) festgelegt und vereinbart und umfassend in dem BAP ausgearbeitet wird (vgl. 2.1 und 5.6.4).

Projektablauf

Wie in Kapitel 4 beschrieben (vgl. Abbildung 4-3), finden die einzelnen Schritte der Implementierung der LC und der BIM-Methodik über alle Projektphasen hinweg statt. Die in dieser Arbeit vorgestellten Elemente zur Taktplanung und -steuerung der Baustelle, LC-Modell, GADGET.P und GADGET.S, werden in Abbildung 5-2 in den Projektablauf eingeordnet.

Wie u. a. in [Verein deutscher Ingenieure, 2019, S. 22-24] beschrieben, existieren keine festgeschriebenen Vorgehensweisen bei der Einführung und Anwendung der LC. Die hier dargestellte Einordnung ist an den in 3.2.4 vorgestellten Ablauf angelehnt und stellt somit eine Übersicht der notwendigen Aktionen und derer Reihenfolge dar. Ihre exakte Festlegung muss in jedem Projekt gemeinsam durch die Projektbeteiligten erfolgen.

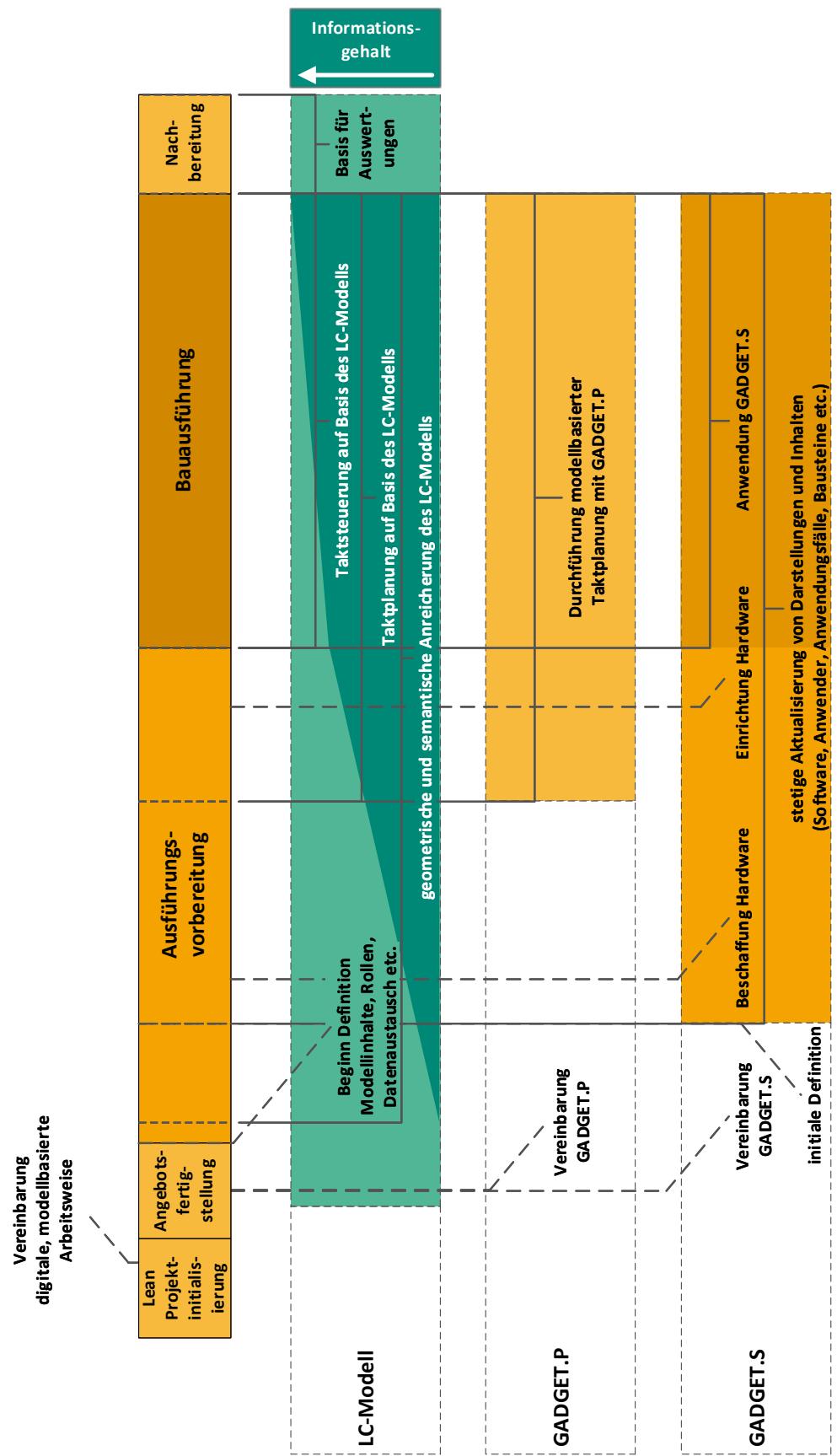


Abbildung 5-2: Einordnung von GADGET.P und GADGET.S sowie LC-Modell in die Projektphasen
(Eigene Darstellung, in Anlehnung an [Verein deutscher Ingenieure, 2019, Bild 1, S. 23])

LC-Modell

Mit Beginn der Ausführungsvorbereitung sollte mit der Definition der im Projektverlauf zu erarbeitenden Modellinhalte und Arbeitsweisen (Zuständigkeiten, Modellaustausch etc.) begonnen werden. Über den Projektverlauf hinweg wird das Modell sowohl mit semantischen, als auch mit geometrischen Informationen angereichert, sodass es stets die zur Taktplanung und -steuerung benötigten Informationen bereithält. Das digitale Modell kann über Bauwerksinformationen hinaus auch Informationen zu der Baustelle, wie bspw. der Baustelleneinrichtung enthalten. Nach Abschluss der Bauausführung können die im Modell vorliegenden Informationen zur Nachbereitung im Rahmen der Nachkalkulation des Projektes ausgewertet werden.

Ganzheitliche digitale erweiterte Taktplanung (GADGET.P)

Aufbauend auf der Entscheidung für eine digitale, modellbasierte Arbeitsweise kann die Festlegung der anzuwendenden digitalen Arbeitsmethoden erfolgen. Dabei bildet die digitale BIM-basierte Taktplanung die Grundlage für die darauf aufbauende Taktsteuerung. Die Taktplanung ist ein mehrstufiger, iterativer Prozess (vgl. 3.3.2). Einige Schritte, wie die Erstellung eines getakteten Feinterminplans, können erst mit Beginn der Bauausführungsphase unter Kenntnis der einzusetzenden Ressourcen durchgeführt werden (vgl. [Verein deutscher Ingenieure, 2019, Bild 1, S. 23]). Vorbereitende Schritte, wie die Analyse des Bauwerks zur Einteilung möglicher Taktbereiche und -abschnitte, können jedoch schon während der Ausführungsvorbereitung erfolgen.

Ganzheitliche digitale erweiterte Taktsteuerungstafel (GADGET.S)

Die Anwendung von GADGET.S sollte ebenfalls frühzeitig vereinbart werden. Dies ermöglicht es allen Projektbeteiligten, an deren Einrichtung mitwirken und so die bestmögliche Arbeitsweise erarbeiten und festlegen zu können. Auch aus [Verein deutscher Ingenieure, 2019, Bild 1, S. 23] wird deutlich, dass die Vorbereitung der Taktsteuerung möglichst frühzeitig erfolgen sollte. Unabhängig davon, ob traditionell mit analogen oder im Sinne der hier vorgeschlagenen Arbeitsweise mit digitalen Taktsteuerungstafeln gearbeitet wird, müssen diese zunächst beschafft und die Baustelle mit ihnen bestückt werden. Im Gegensatz zu analogen Taktsteuerungstafeln, die erst nach dem Aufstellen physisch zusammengestellt werden können, kann GADGET.S bereits vorab softwareseitig eingerichtet werden (vgl. 5.6.2). Nach dem Aufstellen und Einrichten der Hardware können so direkt die gewünschten Inhalte angezeigt werden. Deren Definition erfolgt dabei nicht nur einmalig zu Beginn. Über den gesamten Projektverlauf hinweg können sich die Zusammenstellung der Projektbeteiligten, die Anforderungen an das System sowie dessen Anwendungsfälle stetig ändern. Somit ist es möglich, GADGET.S stets den gegebenen Anforderungen anpassen zu können (vgl. 5.6.3). Die eigentliche Anwendung von GADGET.S für die in 3.3.3 definierten Anwendungsfälle erfolgt während der Bauausführungsphase.

5.2 Annahmen und Festlegungen im Rahmen dieser Arbeit

Im Rahmen der vorliegenden Dissertation werden zur Eingrenzung der betrachteten Problemstellung die nachfolgenden Annahmen und Festlegungen getroffen, die bei weiterführenden Untersuchungen und einer Einführung des vorgestellten Ansatzes in der Praxis berücksichtigt werden müssen.

Personenbezogene Daten der Anwender und Anwenderinnen des Systems (wie die Nationalität), können genutzt werden, um den Bedienkomfort zu verbessern (vgl. 5.5.8), werden aber nicht zwangsläufig benötigt. Eine ausführliche Behandlung der Thematik des Datenschutzes wird nicht vorgenommen.

Wesentliche Voraussetzung der Taktung des Bauablaufs ist eine Verknüpfung der durchzuführenden Herstellungsprozesse mit dem Bauwerk resp. dessen digitalem Modell. Es wird im Weiteren davon ausgegangen, dass das über die Taktplanung hinausgehende Wissen über diese Abhängigkeiten zwischen Bauteilen, Herstellungsprozessen und weiteren Informationen bereits digital formalisiert vorliegt.

Projektstruktur

Im Kontext der Definition von Arbeitsweisen zur Projektdurchführung sind stets strukturelle Rahmenbedingungen, die sich aus Projektentwicklungsform, Projektzusammensetzung und vertraglichen Strukturen ergeben, einzubeziehen.

Dabei steht im Sinne der LC und der BIM-Methodik vor allem eine kollaborative und partnerschaftliche Zusammenarbeit im Mittelpunkt. Im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit wird eine solche als gegeben angenommen und vertragliche Abhängigkeiten zwischen den Beteiligten vernachlässigt. Die im Weiteren genannten Projektrollen sind exemplarisch gewählt und an der Projektentwicklung durch einen Generalunternehmer (GU), der Teilleistungen an Nachunternehmer (NU) weiter vergibt, orientiert. Dabei fungieren der Bauherr als Auftraggeber (AG) und der GU als dessen Auftragnehmer (AN).

Es werden beispielhaft Begriffe und Vorgehensweisen aus dem Hochbau (z. B. bei der Gliederung von Gewerken oder im Rahmen der Taktplanung) verwendet. Das vorgestellte Konzept und dessen Umsetzung sind jedoch nicht auf den Hochbau beschränkt, sondern allgemeingültig.

Es wird angenommen, dass die Rolle des Lean Construction Managements von der Bauleitung mit übernommen wird. Sie kann jedoch ebenso von speziell für diesen Kontext angestellten Fachleuten ausgefüllt werden. Die durchzuführenden Prozesse werden dadurch nicht beeinflusst.

Technische Voraussetzungen

Das in dieser Dissertation vorgestellte Konzept basiert auf einer großen Menge heterogener Daten. Es wird beispielhaft gezeigt, wie diese miteinander verknüpft werden können.

Eine vollumfängliche Betrachtung der – aktuell in der Praxis im Fokus stehenden – technischen Entwicklungen hinsichtlich der Datenhaltung, des Datenaustauschs und der Konvertierung zwischen verschiedenen Datenformaten wird nicht durchgeführt. Ansätze, wie die Nutzung von CDEs, sind mit dem beschriebenen Konzept vereinbar und werden zu dessen Anwendung als gegeben vorausgesetzt.

Es wird darüber hinaus davon ausgegangen, dass für alle Anwender – insb. auf der Baustelle – eine ständige Internetverbindung zur Verfügung steht.

5.3 Datenbank GADGET.DB und LC-Modell als Informationsbasis

Als Informationsbasis für die digitale Taktplanung und -steuerung dienen ein digitales Modell, in dem Baustellen- und Bauwerkselemente gespeichert werden und das im Sinne der BIM-Methodik ein Fachmodell der LC darstellt, sowie eine Datenbank, in der alle weiteren, nicht direkt modellbezogenen Informationen abgelegt werden.

5.3.1 Datenbank GADGET.DB

In der Datenbank GADGET.DB werden alle Informationen gespeichert, die nicht direkt in dem LC-Modell hinterlegt werden und zur Taktplanung sowie Taktsteuerung und allgemein dem Betrieb von GADGET.S dienen. Da die Umsetzung von GADGET.S in Form von Webanwendungen konzeptioniert ist und GADGET.P auf derselben Datenbasis fußt, kommt eine dokumentenbasierte NoSQL Datenbank zum Einsatz, in der Datensätze in Form von JSON-Objekten verwaltet werden. Im Gegensatz zu relationalen Datenbanken müssen bei NoSQL Datenbanken keine festen Schemata vorgegeben werden. Somit stellen sie dynamisch anpassbare Systeme dar, bei denen während des Betriebs Anpassungen ohne (Schema-)Änderungen an allen bereits bestehenden Datensätzen vorgenommen werden können. Dies ist insb. hinsichtlich der Flexibilität von GADGET.S hilfreich, da so Erweiterungen durch neue Bausteine (vgl. 5.5.11) oder Datenquellen problemlos in laufenden Projekten erfolgen können, ohne die Datenkonsistenz bestehender Einträge zu gefährden.

Auch wenn NoSQL Datenbanken prinzipiell schemilos sind, ist es zur strukturierten Implementierung notwendig, zu definieren, wie und welche Daten beschrieben werden. Dazu ist in Abbildung 5-3 dargestellt, welche Objekte im Rahmen des vorgestellten Konzeptes in GADGET.S benötigt werden.

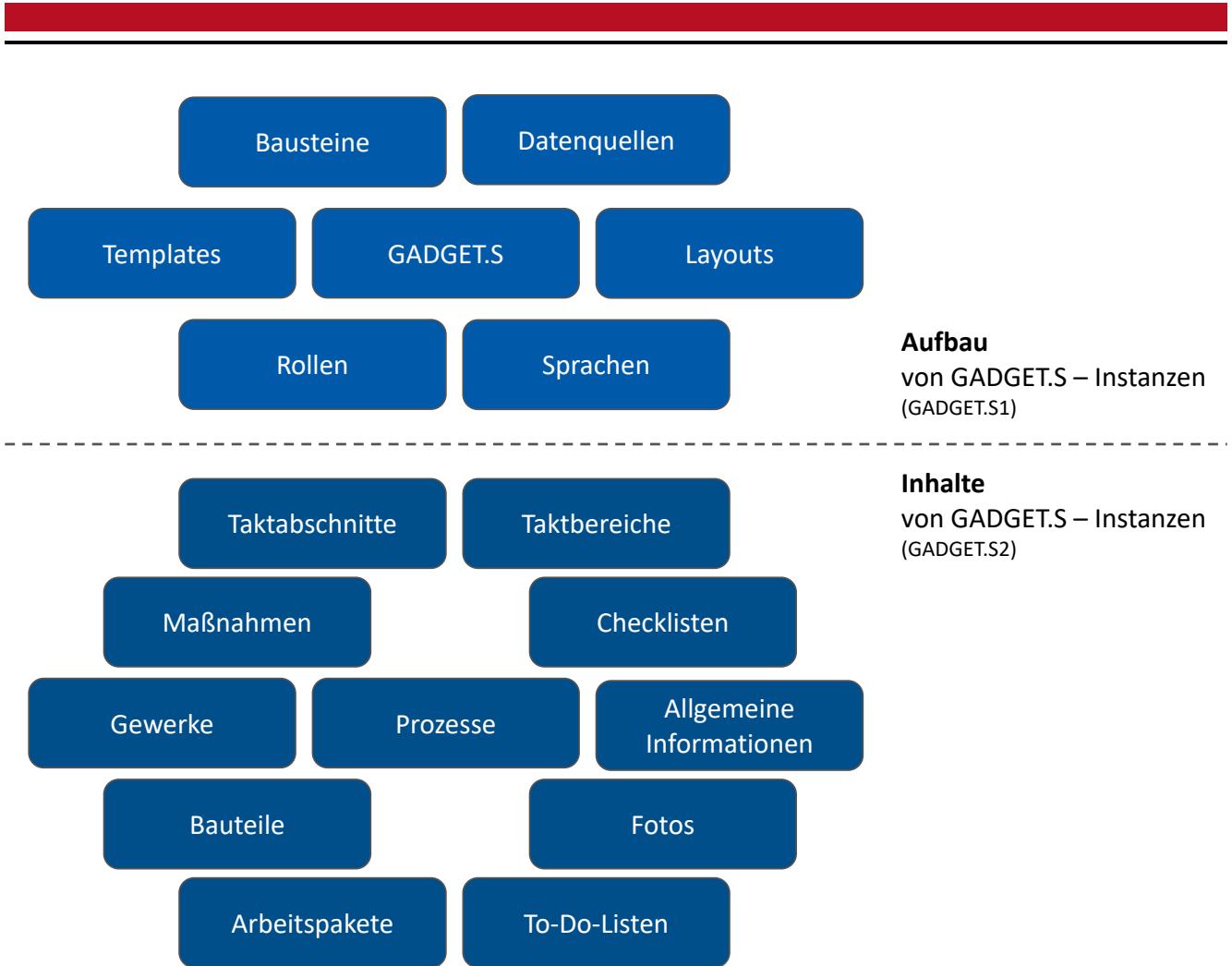


Abbildung 5-3: Übersicht der in GADGET.DB gespeicherten Objekte (Eigene Darstellung in Verbindung mit [Grund, 2018, S. 86]))

5.3.2 LC-Modell

Das LC-Modell dient als zentrales Element sowohl zur Informationsverwaltung, als auch zur Visualisierung von Abläufen und dem Status der Baustelle. Es muss mit den Projektbeteiligten abgestimmt und stets auf dem aktuellen Stand gehalten werden. Der LC kommt damit eine wichtige Fachrolle in der BIM-basierten Projektabwicklung zu. In dieser Arbeit dient das LC-Modell als Grundlage zur Taktplanung und -steuerung und ist zentraler Bestandteil von GADGET. Darüber hinaus kann es auch tiefergehende Informationen in weiteren Bereichen mit Schnittmengen zur LC, wie bspw. der Planung und Steuerung der Baulogistik, enthalten [Leifgen u. Kujajewski, 2018]. Die zur Arbeit mit dem Modell erforderliche Definition von Rollen, Zuständigkeiten, Modellinhalten, Modellaustauschszenarien etc. erfolgt in dem BAP (vgl. 5.6.4). In Abbildung 5-4 ist ein beispielhaftes LC-Modell mit einer 3D-Ansicht sowie einer 2D-Planansicht dargestellt.

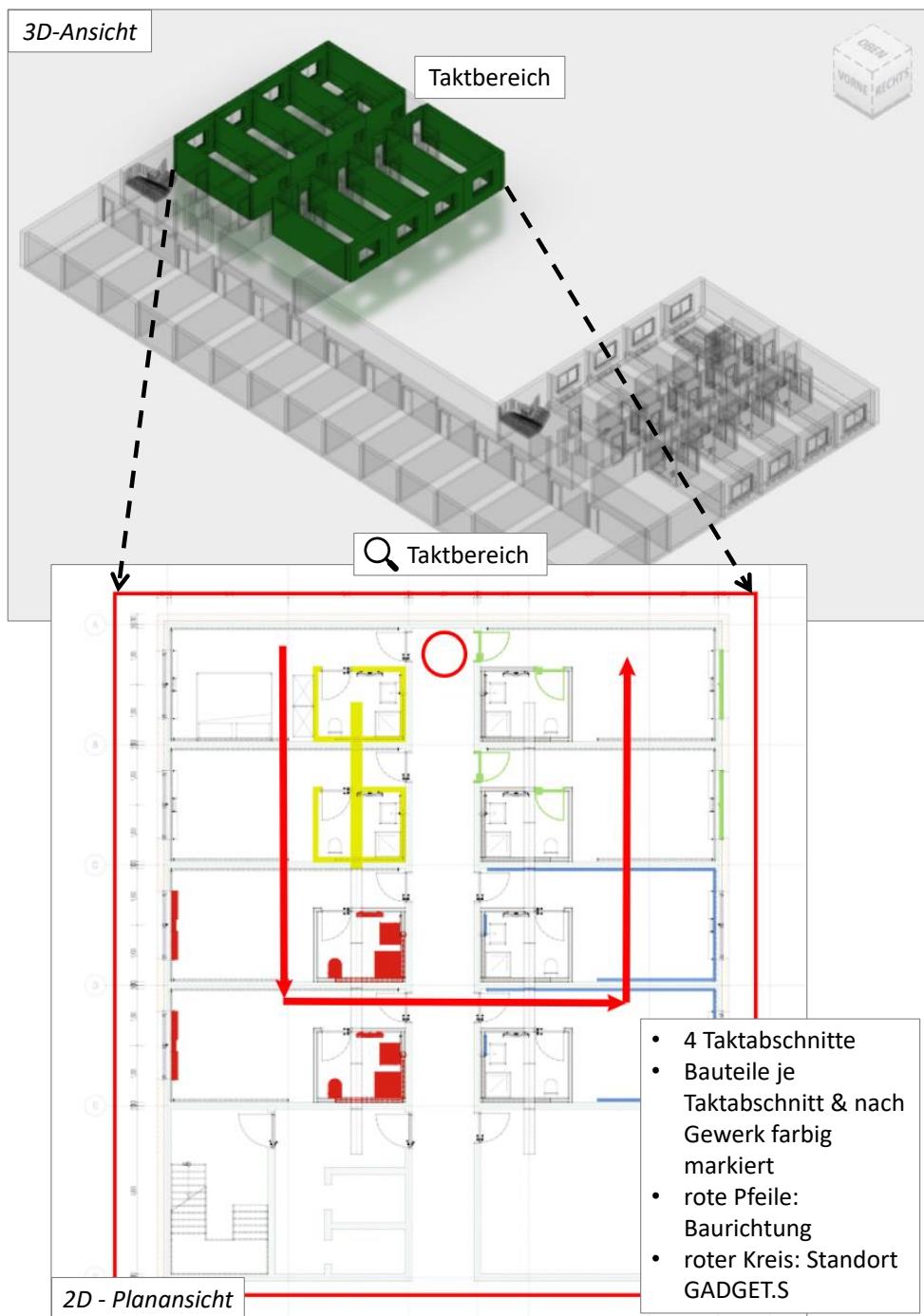


Abbildung 5-4: Beispielhafte Darstellung eines LC-Modells (Eigene Darstellung, aufbauend auf [Grund, 2018])

Modellinhalte, Detaillierungstiefen und Datenaustausch

In dem LC-Modell werden geometrische und semantische Informationen mit Bezug zu dem herzustellenden Bauwerk und dessen Elementen (Bauteile, Gebäudeausrüstungselemente etc.) und der Baustelle gespeichert. Es wird aus einem Koordinationsmodell abgeleitet, das in Abhängigkeit der zu planenden Bauabläufe neben den Informationen der LC auch solche bezüglich der

jeweils beteiligten Fachdisziplinen in sich vereint. Datenbasis sind die Fachmodelle aller von der Taktung der Baustelle betroffenen Fachplanungen und Gewerke sowie Informationen über die Baustelle aus der Baustelleneinrichtungsplanung. Eine Übersicht der Inhalte und möglicher Anwendungsfälle ist in Abbildung 5-5 dargestellt.

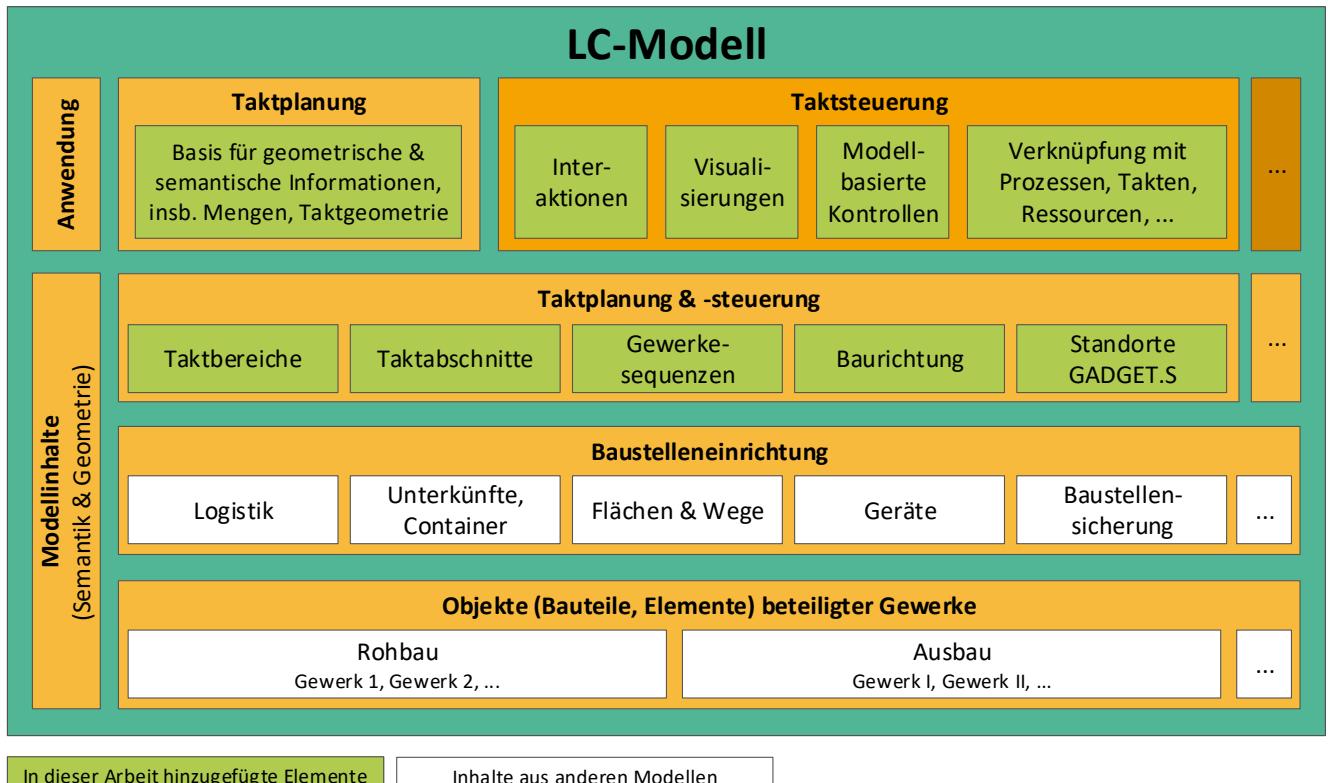


Abbildung 5-5: Bestandteile und Anwendungsfälle des LC-Modells (Eigene Darstellung)

Der Informationsgehalt des LC-Modells wächst über die Planungs- und Bauausführungsphasen hinweg stetig und wird dabei gemäß des Level of Information (LoI)-Prinzips über die Definition verschiedener Detaillierungstiefen festgelegt. Da nicht immer alle Modellinhalte benötigt werden, werden i. d. R. in Abhängigkeit der Modellaustauschszenarien und -anwendungsfälle meist nur Teilmengen des Gesamtmodells benötigt und verwendet. Um bspw. im Rahmen der Taktsteuerung eine auf dem Bauwerksgrundriss aufbauende 2D-Ansicht der Taktabschnitte und -bereiche zu visualisieren, wird im Sinne des visuellen Managements und des 5R-Prinzips (richtige Information in der richtigen Detaillierung zur richtigen Zeit in der richtigen Menge am richtigen Ort) nur eine einfache Ansicht des Gebäudegrundrisses in einer niedrigen Detaillierung benötigt. Zu detaillierte gewerkespezifische Inhalte sind für diesen Anwendungsfall nicht erforderlich und schaffen eine ungewollte Unübersichtlichkeit. Die Definition des Umfangs der auszutauschenden Modellinhalte kann bspw. bei einer IFC-basierten Arbeitsweise mittels Model View Definitions erfolgen. In diesen wird konform zum IFC-Schema spezifiziert, welche Teilmengen an Elementen (Entitäten und Attribute) aus der IFC-Hierarchie herausgefiltert und welche erhalten bleiben sollen [Borrmann u. a., 2015, S. 129]. Diese allgemeinen Vorschrif-

ten zur Filterung können anwendungsfallspezifisch bei jedem Austauschvorgang auf digitale Bauwerksmodelle angewandt werden.

Rollen und Zuständigkeiten

Neben der Festlegung der Modellinhalte und korrespondierender Detaillierungsgrade, stellt die klare Definition und Zuordnung von Rollen, Zuständigkeiten und Datenaustauschszenarien hinsichtlich digitaler Bauwerksmodelle einen wichtigen Bestandteil der BIM-basierten Arbeitsweise dar, der von den jeweiligen Projekt- und Unternehmensstrukturen abhängt. Die Definitionen werden projektspezifisch in einem BAP festgehalten. Dies stellt eine Aufgabe dar, die in den Zuständigkeitsbereich des BIM-Managements fällt.

Wie in Abbildung 5-6 dargestellt, erfolgt die Nutzung des LC-Modells – bspw. zur Anwendung von GADGET.S – auf Basis des aktuellen, in dem CDE hinterlegten Modellstandes.

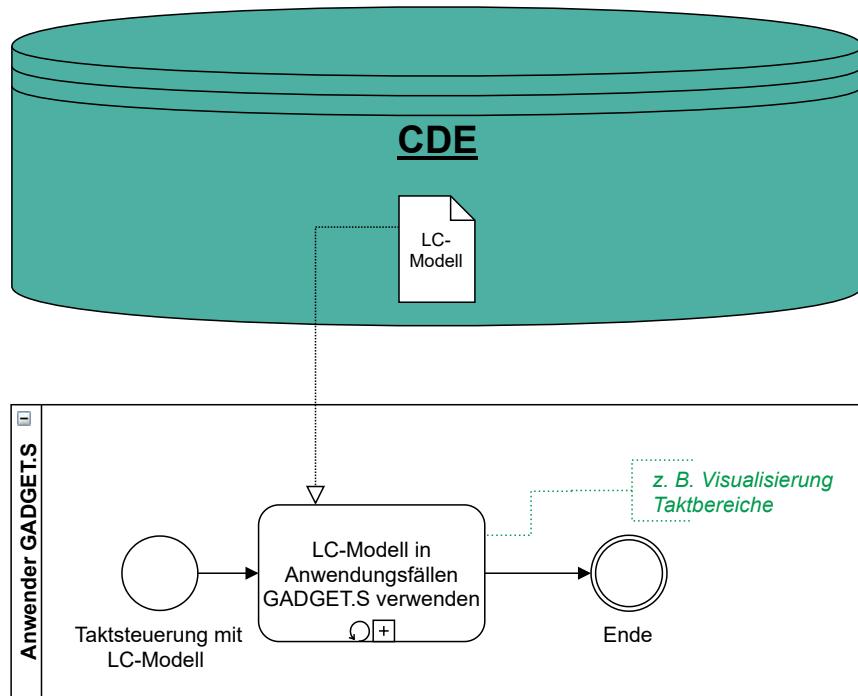


Abbildung 5-6: Diagramm eines Beispielprozesses zur Anwendung des LC-Modells nach BPMN-Spezifikation (Eigene Darstellung)

Ein Beispielprozess für den Ablauf der Erstellung und Aktualisierung des LC-Modells ist in Abbildung 5-7 dargestellt. Ist eine spezialisierte LC-Abteilung (LC-Management) über die gesamte Projektlaufzeit beteiligt, sollte diese in enger Absprache mit der Bauleitung die Erstellung und Pflege des LC-Modells übernehmen. Andernfalls kann die Erstellung und Definition des Modells durch LC-Spezialisten (BIM-Koordination LC) erfolgen und seine Pflege während der Bauausführung von der Bauleitung durchgeführt werden. Wesentlicher Bestandteil der Arbeit mit dem LC-Modell ist die Koordination mit den über den Projektverlauf variierenden Fachplanern und

den von ihnen erstellten und stetig überarbeiteten Versionen ihrer Fachmodelle. Diese Aufgabe kann von der BIM-Gesamtkoordination übernommen werden. In dem dargestellten Beispielprozess wird dahingehend unterschieden, ob bereits eine Version des LC-Modell vorliegt oder nicht. Alle Modelle werden zentral über ein CDE verwaltet. Aufbauend auf einem aus den Fachmodellen erstellten Koordinationsmodell wird das LC-Modell entwickelt.

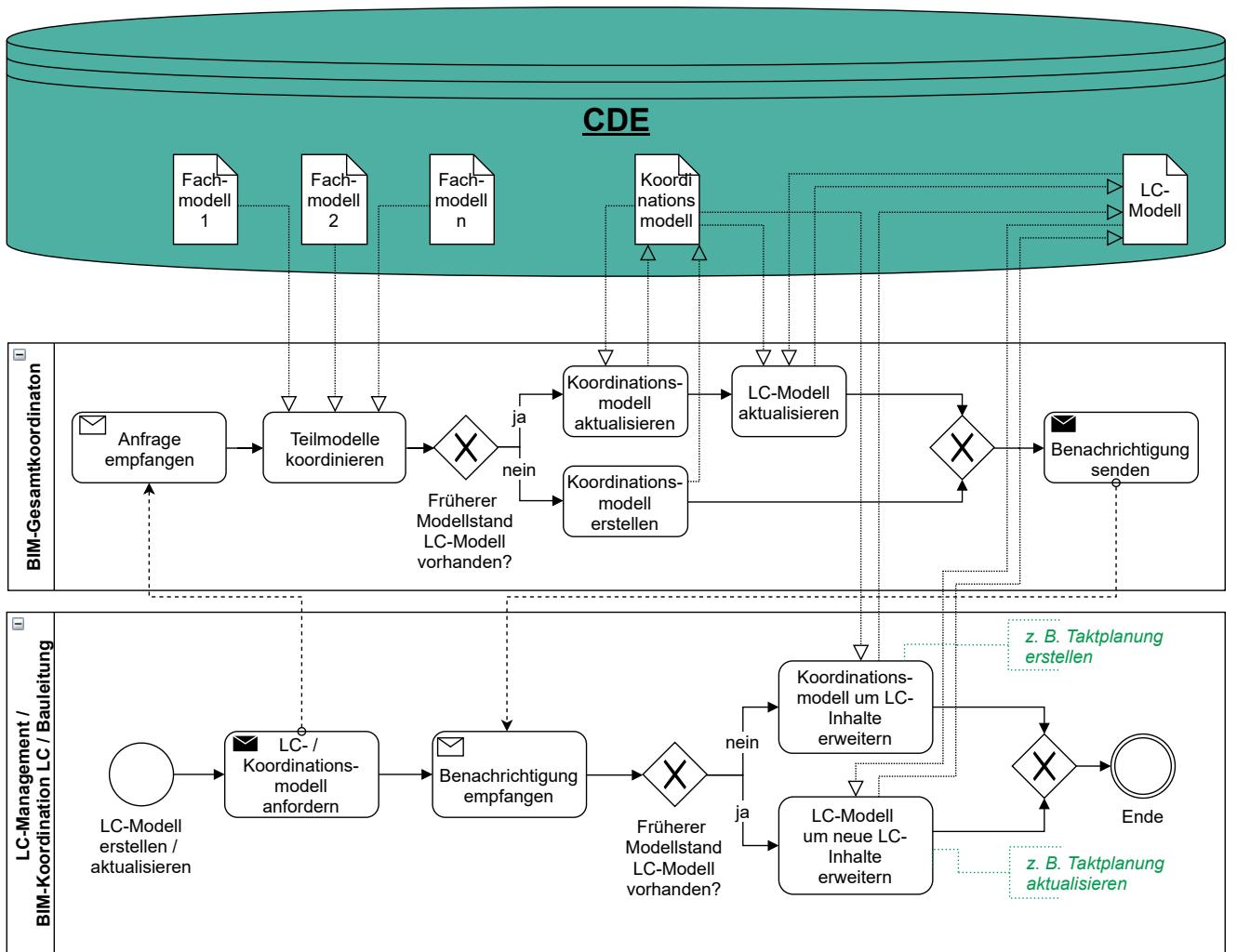


Abbildung 5-7: Diagramm eines Beispielprozesses zur Erstellung und Aktualisierung des LC-Modells nach BPMN-Spezifikation (Eigene Darstellung)

5.4 Ganzheitliche digitale erweiterte Taktplanung GADGET.P

Wie in 3.3.2 beschrieben, ist die Taktplanung ein komplexer Prozess mit verschiedenen Eingangsgrößen und vielen voneinander abhängigen, teils rekursiven Einzelschritten. Diese werden i. d. R. unter Zuhilfenahme von Tabellenkalkulationssoftware durchgeführt. Insbesondere bei der Berechnung verschiedener Varianten und der Abstimmung vieler Gewerke bedeutet dies einen großen Zeitaufwand und bietet Raum für Fehler. In diesem Abschnitt wird daher ein Konzept zur Unterstützung und Teilautomatisierung der Taktplanung vorgestellt, das im Sinne

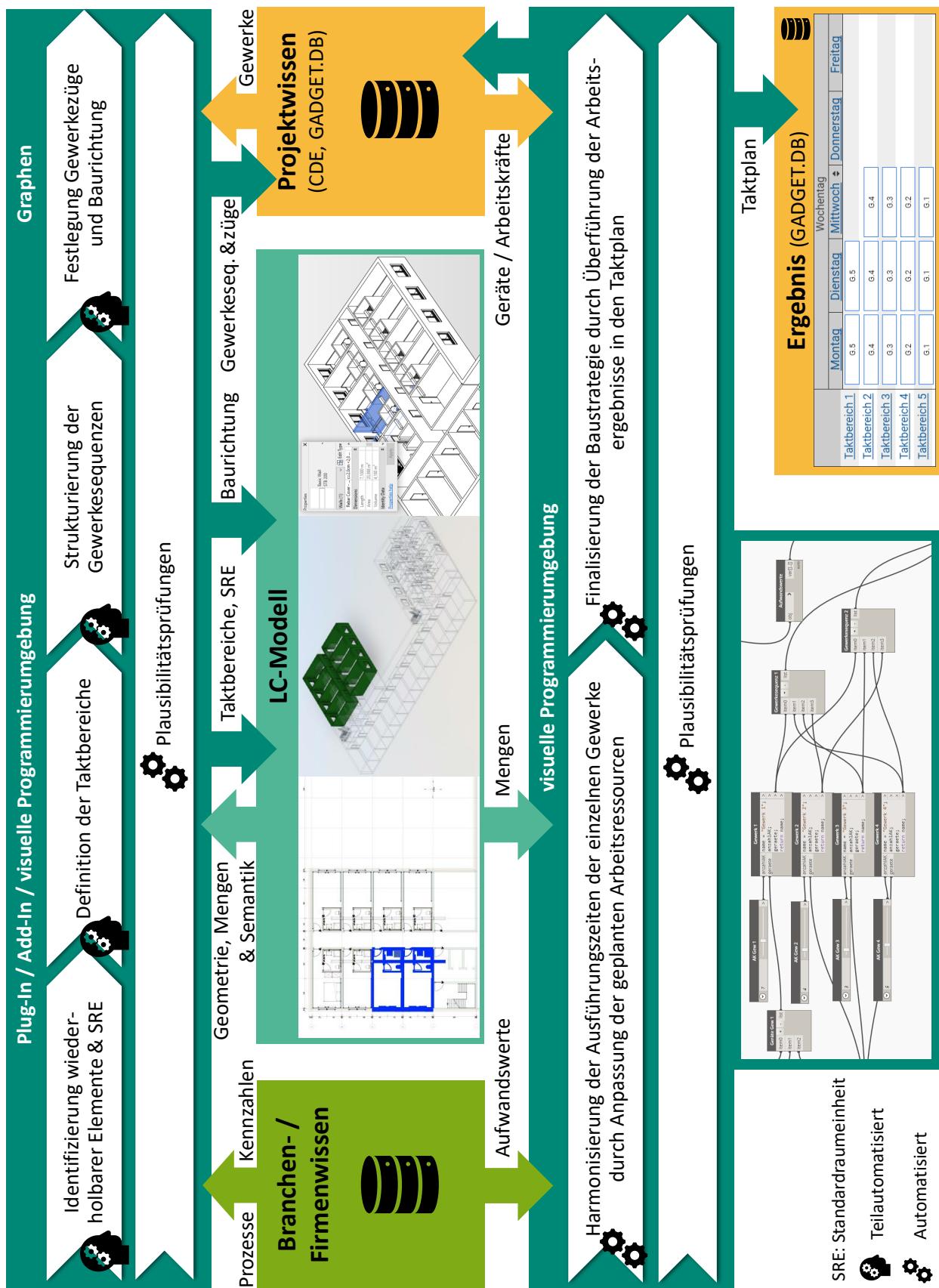
der BIM-Methodik nativ auf in digitalen Bauwerksmodellen hinterlegten Informationen aufbaut, die Grundlage zur Anwendung von GADGET.S bietet und zur Qualitätssteigerung und Aufwandsreduktion in der Taktplanung dient.

Als softwaretechnische Grundlage können erweiterbare Analyse- oder Modellierungsanwendungen dienen, die ein modell- und objektbasiertes Auslesen und Schreiben von Informationen ermöglichen. Die Programmlogik wird darin durch den Einsatz visueller Programmiersprachen derart unterstützt und abstrahiert dargestellt, dass Planer direkt auf Programmierebene auf Basis weiterer angebundener Datenquellen, wie Datenbanken von Aufwandswerten und Ressourcen, Berechnungen durchführen lassen und bei Bedarf leicht Anpassungen vornehmen können. Planungsabläufe können dadurch so miteinander verknüpft werden, dass bei Änderungen erneute Berechnungen automatisch durchgeführt werden. Der in Abbildung 5-8 dargestellte Ablauf umfasst die in 3.3.2 beschriebenen zentralen Schritte der in [Verein deutscher Ingenieure, 2019, S. 83] geschilderten Vorgehensweise zur Taktplanung in angepasster Form. Aufgrund der digitalen Datenbasis können über alle Prozessschritte hinweg Plausibilitätsprüfungen durchgeführt werden, sodass Fehler direkt aufgedeckt und reduziert werden können.

Identifizierung wiederholbarer Elemente und Standardraumeinheiten

Mittels einer automatisierten Analyse aller in einem Koordinationsmodell zusammengeführter Fachmodelle hinsichtlich semantisch definierbarer Funktionskategorien wie Gebäudehülle, Technikräume oder Treppenhäuser (vgl. [Binninger u. Wolfbeiß, 2018b, S. 166]), räumlichen und topologischen Abhängigkeiten sowie der Vorkommenshäufigkeiten der Objekte (Bauteile, Gebäudeausrüstungselemente etc.) werden Funktionscluster gebildet. Überdies können die mit den Objekten verknüpften Informationen über Herstellungsprozesse und technologische Abhängigkeiten zur Einordnung einbezogen werden. So können verschiedene Varianten für Funktionscluster ermittelt, im LC-Modell hinterlegt und als Besprechungsgrundlage für die endgültigen Festlegungen durch das Projektteam genutzt werden.

Aufbauend auf der Festlegung der Funktionscluster werden auf die darin enthaltenen Elemente hinsichtlich sich wiederholender Gruppen von Objekten analysiert. Dabei können neben semantischen auch geometrische Informationen genutzt werden, um die kleinsten gemeinsamen Vielfachen oder Standardraumeinheiten zu identifizieren. Da diese bauwerkstopologisch häufig auf Ebene von Räumen zu finden sind, können bspw. alle Räume miteinander auf Schnittmengen in den enthaltenen Objekten und deren Attribute hin analysiert werden. Gleiches gilt für diese zu einem vorgegebenen Mindestanteil und treten die Objektzusammenstellungen häufiger als ein festgelegter unterer Grenzwert auf, so können sie als Standardraumeinheit definiert werden und es kann eine entsprechende Zuordnung über Attributierung der Objekte des Bauwerksmodells erfolgen. Zusätzlich werden Volumenkörper im LC-Modell erstellt, die sich jeweils über die einzelnen Standardraumeinheiten erstrecken.



Einen ergänzenden Ansatz stellt die Analyse von Aktionen und Ereignissen auf Anwenderebene während der Modellierung der Bauwerksmodelle dar. Werden dabei bspw. Gruppen von Objekten kopiert, so deutet dies bereits bei dem Entwurf darauf hin, dass sich auch die Herstellungsprozesse dieser kopierten Gruppen wiederholen und diese somit Standardraumeinheiten bilden.

Definition der Taktbereiche

Die Standardraumeinheiten können in gemeinsamer Absprache des Projektteams zu Taktbereichen zusammengefasst werden. Dabei können – im Gegensatz zur bisherigen Vorgehensweise – durch digital vorliegendes Wissen über Mengen und Kennzahlen sowie Kenntnis über standardisierte Herstellungsabläufe und Ressourcen automatisch verschiedene Grobvarianten für die Einteilung der Taktbereiche ermittelt und vorgeschlagen werden. Diese können bei Bedarf und in Abhängigkeit der Komplexität des Bauvorhabens zur besseren Nachverfolgbarkeit der Arbeiten in übergeordnete Taktabschnitte gegliedert werden. Die endgültige Einteilung der Taktbereiche erfolgt durch das Projektteam auf Basis der Varianten.

Strukturierung der Gewerkesequenzen

Nach der Definition der Taktbereiche können aus dem digital vorliegenden Wissen über technologische Abhängigkeiten, Prozesse sowie die herzustellenden Elemente – bspw. durch einen in einer visuellen Programmierumgebung umgesetzten Algorithmus – automatisiert computer-generierte Vorschläge zur Sequenzierung der Gewerke und damit der Zusammensetzung der Gewerkezüge abgeleitet werden. Durch das Projektteam können Parameter und die finalen Zusammenstellungen der Gewerkezüge weiter angepasst werden. In diesem Schritt kann auch die manuelle Eingabe weiterer Eingangsgrößen, wie eine für alle Projektteilnehmer realisierbare Taktzeit, erfolgen.

Festlegung der Anzahl der Gewerkezüge und Baurichtung

Auf Basis des ermittelten Aufbaus der Gewerkezüge wird nach der konventionellen Herangehensweise von dem Projektteam festgelegt, wie diese die Taktabschnitte durchlaufen und ob mehrere Gewerkezüge parallel arbeiten sollen. Als ein wichtiger Eingabeparameter werden dazu die Bauwerks- resp. Taktabschnittsgeometrien benötigt. Das Ziel ist es, einen möglichst effizienten Weg des Gewerkezugs durch den Bauwerksgrundriss zu finden, wobei neben der örtlichen Verteilung ablauftechnische Parameter, wie die Gewährleistung von Baufreiheit, berücksichtigt werden müssen.

Ein Ansatz, diese Planungsaufgabe computerbasiert zu unterstützen und zu automatisieren, liegt in der Anwendung der Graphentheorie. Graphen können dazu bspw. in Form analytisch

auswertbarer Petri-Netze genutzt werden [Reisig, 2010, S. 21-34]. Taktabschnitte und -bereiche werden durch Knoten (Stellen) repräsentiert, Kanten stellen deren Verbindungen dar. Durch eine Gewichtung der Kanten kann die Distanz zwischen zwei Knoten beschrieben werden. In Petri-Netzen lassen sich verschiedene Zustände und Bedingungen für die Übergänge (Transitions) zwischen diesen definieren. Die Verteilung der Gewerke je Takt stellt dabei jeweils einen solchen Zustand dar, in dem Gewerke durch spezifische Marken repräsentiert werden. So kann sichergestellt werden, dass an jeder Stelle in einem definierten Zustand stets nur ein Gewerk tätig sein kann. Als eine Bedingung für Transitionen kann dazu definiert werden, dass die zuvor festgelegte Gewerksequenz eingehalten wird.

Durch die Abbildung der Gewerkezeuge in Form von Graphen können somit unter Einhaltung vorgegebener Randbedingungen sowohl die optimale Anzahl als auch die besten Wege (Baurichtung) der Gewerkezeuge ermittelt und simuliert werden. Die Ergebnisse dieses Schrittes werden in dem LC-Modell und der GADGET.DB gespeichert.

Harmonisierung der Ausführungszeiten der einzelnen Gewerke

Ziel der Taktplanung ist es, Ressourcen (Arbeitskräfte und Geräte) so zu bemessen, dass Gewerke zur Durchführung der Arbeitsprozesse die Dauer eines Taktes (oder ggf. ein Vielfaches davon) benötigen. Um dies zu erreichen, können mögliche Kapazitäten (minimale und maximale Werte) der Geräte und Arbeitskräfte von den Zuständigen festgelegt werden. Auf Basis der automatisch aus dem LC-Modell ermittelten Mengen (Massen, Volumina, Flächen) je Taktbereich können automatisch die optimalen Werte ermittelt werden. Wird keine passende Lösung gefunden, so können Parameter wie Taktdauer, Taktbereichsgröße, Anzahl der Gewerkezeuge oder Kapazitäten angepasst werden. Dieses Vorgehen muss ggf. in mehreren Iterationen durchlaufen werden, bis eine optimale Harmonisierung der Ausführungszeiten gefunden wird.

Finalisierung der Baustrategie

Alle im Rahmen der Taktplanung ermittelten Informationen werden digital in dem LC-Modell (Daten mit Bauwerksbezug) und der GADGET.DB hinterlegt. Der ermittelte Taktplan kann automatisch mithilfe von GADGET.S dargestellt und zur Steuerung verwendet werden.

Plausibilitätsprüfungen

Der bei einer manuellen Taktplanung zeitaufwändige Vorgang der Plausibilitätsprüfung, der nach jeder Änderung erneut durchgeführt werden muss, kann bei einer digitalen und BIM-basierten Taktplanung permanent stattfinden. Je nach Planungsfortschritt und Datenlage werden dabei in den zuvor beschriebenen Schritten auf Basis hinterlegter Regeln und Algorithmen

entweder nur plausible Benutzereingaben zugelassen oder bei inkonsistenten Eingaben Warnmeldungen ausgegeben.

5.5 Ganzheitliche digitale erweiterte Taktsteuerungstafel GADGET.S

Im Folgenden wird ein Konzept vorgestellt, das aufzeigt, wie Taktsteuerungstafeln durch eine digitale Umsetzung und den Einsatz digitaler Technologien umgestaltet und erweitert werden können. Basis dafür ist die Integration des entworfenen Systems in die BIM-Methodik. Damit sollen nicht nur aufwändige Prozesse vereinfacht werden oder entfallen können, sondern auch ein besseres Verständnis der komplexen Zusammenhänge verschiedener Informationsbereiche gefördert werden. Es wird gezeigt, wie ein solches System für neue und mit herkömmlichen Taktsteuerungstafeln nicht umsetzbare Anwendungsfälle genutzt werden und eine kollaborative, gemeinschaftliche Zusammenarbeit begünstigen kann. Somit fungiert das als Ganzheitliche Digitale Erweiterte TaktSteuerungstafel (GADGET.S) bezeichnete System nicht nur als reines digitalisiertes Kontroll- und Steuerungsinstrument, sondern bietet darüber hinaus ein erweitertes, kontextsensitives und anpassbares Funktionsspektrum, das Potential zur Verbesserung bestehender Arbeitsabläufe und einer damit einhergehenden Produktivitätssteigerung bietet. Es ermöglicht u. a.

- Aktuelle, automatisierte Berechnungen, Auswertungen und Darstellungen – bspw. von Kennzahlen
- Verknüpfung von Informationen zur impliziten Ableitung weiterführenden Wissens
- Bereitstellung einer zentralen, vernetzten und aktuellen Informationsbasis
- Ortsunabhängige Darstellung beliebig zusammengestellter Informationen auf verschiedenen Endgeräten
- Dynamische Informationsvisualisierung mit anpassbaren Informationstiefen
- Neue Möglichkeiten zur Interaktion mit den dargestellten Inhalten

Aufbauend auf der Vorstellung der Anwendergruppen und Anwendungsfälle von GADGET.S in 3.3.3 sowie der Beschreibung der sich daraus ergebenden Anforderungen in 3.3.4 und den in 3.3.5 abgeleiteten Funktionalitäten und Systemeigenschaften werden im Folgenden Ausführungen zu der Struktur, Eigenschaften, möglichen technischen Umsetzungen und Beispiele für Anwendungsmöglichkeiten aufgezeigt.

5.5.1 Softwarearchitektur

Wie in Abbildung 5-9 dargestellt, ist GADGET.S nach Funktionsbereichen in drei Schichten gegliedert. Die Benutzerschnittstellen zur Bedienung der Anwendung umfassen die Visualisierung der Inhalte sowie Möglichkeiten zur Interaktion mit dem System.

Weitere Funktionsbereiche bilden die Datenverarbeitung und Datenhaltung. Die programmier-technische Umsetzung erfolgt nach dem Client-Server-Modell unter Nutzung von Webtechnolo-gien und standardisierten Webschnittstellen. Darüber hinaus wird eine Anbindung externer Datenquellen (z. B. Gebäudemodellserver, Dokumentenmanagementsysteme oder webbasierte Dienste, wie zur Abfrage von Wetterdaten) durch die Integration in ein CDE ermöglicht. Dies kann nach [DIN SPEC 91391-2:2019-04, 2019] umgesetzt werden, worin die „[...] Anforderun-
gen zu Vorgehensweise und Datenstrukturen bei einem Datenaustausch zwischen CDEs unter-
einander oder einem CDE und anderen Softwareprodukten [...]“ [DIN SPEC 91391-2:2019-04,
2019, S. 6] definiert werden.

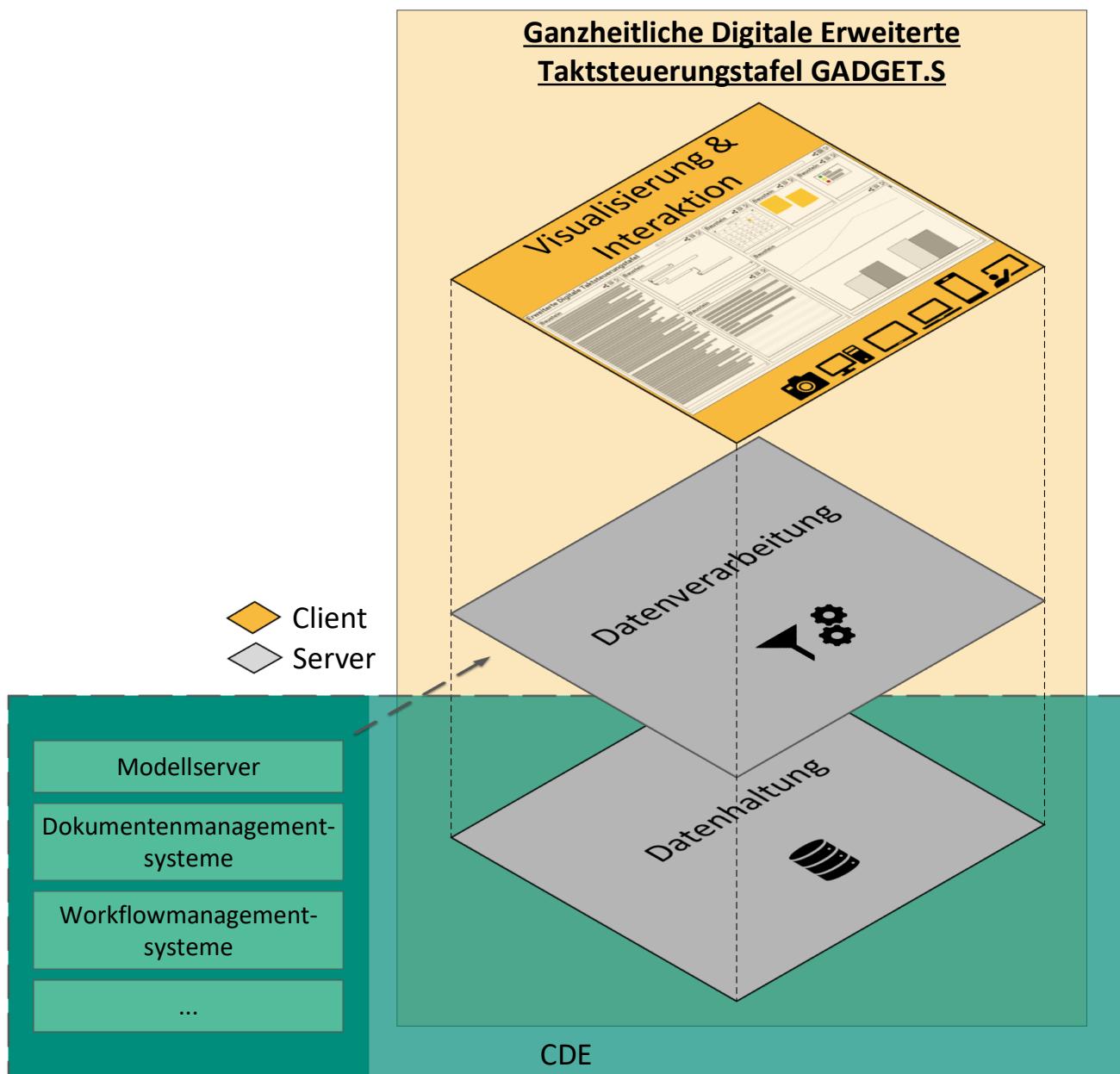


Abbildung 5-9: GADGET.S – Übersicht des Softwarekonzepts (Eigene Darstellung)

Hardwareseitig werden die Datenhaltung und Datenverarbeitung auf einem zentralen *Server* ausgeführt. Die Benutzung der GADGET.S kann losgelöst davon und in Abhängigkeit des jeweiligen Anwendungsfalls auf beliebigen mobilen oder stationären Endgeräten der Anwender (*Clients*) erfolgen.

Die in Abbildung 5-10 dargestellte Struktur der Attribute und Funktionen von GADGET.S spiegeln die in 5.6 beschriebenen Stufen ihrer Anwendung wider. Projektunabhängige Templates (*GADGET.S.Template*) bilden die abstrakteste Stufe. Sie umfassen auf Basis der anvisierten Anwendungsfälle mögliche Rollen und Datenquellen sowie dazu passende Endgeräte und Baustein-Templates. Um Templates in Projekten zu nutzen, können die tatsächlich beteiligten Rollen ausgewählt sowie benötigte Sprachen den Layouts (*GADGET.S.Layout*) zugeordnet werden. Für den Einsatz während der Projekte werden die Inhalte weiter konkretisiert (*GADGET.S*), indem Personen und Bausteine mit konkreten Datenquellen definiert werden.

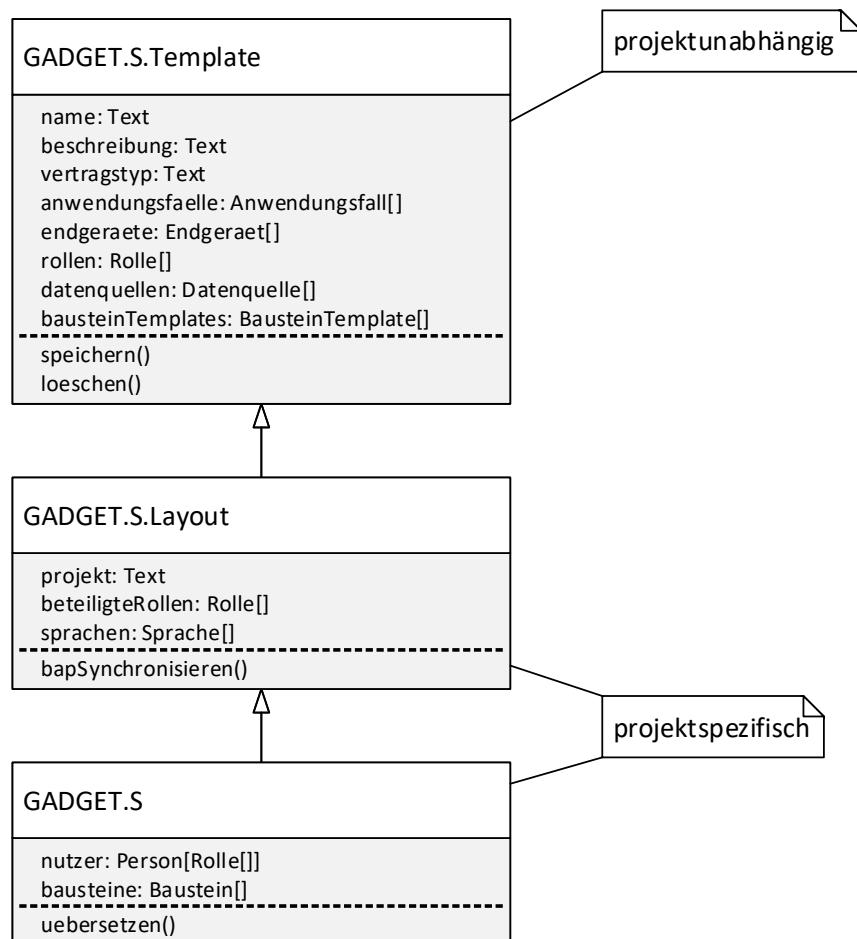


Abbildung 5-10: UML-Klassendiagramm der Struktur, Attribute und Funktionen von GADGET.S
(Eigene Darstellung nach [ISO/IEC 19505-1:2012(E), 2012])

Benutzeroberfläche

In Abbildung 5-11 ist der schematische Aufbau der Benutzeroberfläche der GADGET.S dargestellt. Sie setzt sich aus einer Funktionsleiste am oberen Rand sowie einer Fläche zur Darstellung einzelner Bausteine, die während des Einrichtungsprozesses (vgl. 5.6.1) frei positioniert und skaliert werden können, zusammen. In der Funktionsleiste der GADGET.S sind neben der Bezeichnung des angezeigten Layouts ein Suchfeld zur gezielten Suche nach Informationen (Dokumente, Personen etc.), Schaltflächen und QR-Codes zum Teilen und Übertragen von Inhalten sowie – für berechtigte Benutzer – eine Schaltfläche zum Aufrufen von Einstellungen vorhanden. Sollte die für einen Baustein definierte Darstellungsfläche für eine detailliertere Ansicht nicht ausreichend sein, wird der Baustein temporär vergrößert und bei anschließender Auswahl eines anderen Bereichs automatisch verkleinert.

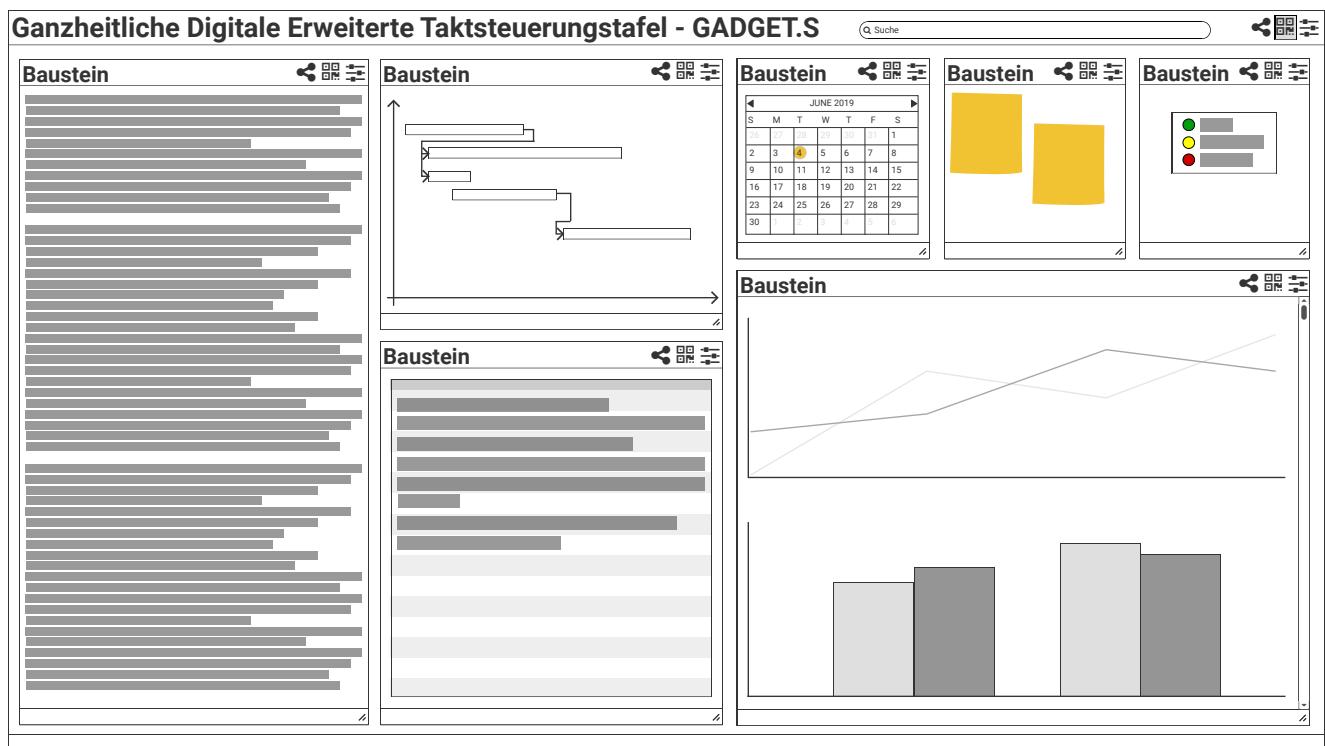


Abbildung 5-11: Schematische Darstellung der Benutzeroberfläche von GADGET.S (Eigene Darstellung)

5.5.2 Bausteine

Um die Anforderung eines flexiblen Systems, das an Projektrandbedingungen anpassbar ist und alle Anwendungsfälle abdecken kann, zu erfüllen, werden die Inhalte der GADGET.S modular in Bausteinen zusammengefasst. Bausteine sind einzelne, funktionsfähige Teile des Gesamtsystems. Sie können miteinander kombiniert werden und aufeinander reagieren, sodass ein in einem Baustein ausgelöstes Ereignis den Zustand eines anderen Bausteins verändern oder ein Ereignis in diesem auslösen kann.

Inhalte

Bausteine können mit dem Bauablauf veränderliche oder sich nie resp. sehr selten ändernde Inhalte darstellen. Veränderliche Inhalte müssen bei analogen Taktsteuerungstafel bisher permanent manuell auf den neusten Stand gebracht werden, wohingegen sie auf der GADGET.S automatisch aktualisiert werden. Viele der mit den Bausteinen dargestellten Informationen können im Vergleich zu analogen Taktsteuerungstafeln durch die digitale Umsetzung stark erweitert werden. Zudem können Inhalte dargestellt und Funktionen bereitgestellt werden, die bislang nicht abbildungbar waren. Dies ist insb. an den Möglichkeiten zur Interaktion (z. B. mit digitalen Bauwerksmodellen) und Datenaufnahme (direkte digitale Eingabe von Informationen ohne zusätzliche Schritte der Digitalisierung im Nachgang) ersichtlich. Kontextabhängig lassen sich relevante Informationen hervorheben, weniger wichtige Inhalte können abstrahiert oder vollständig ausgeblendet werden (vgl. 5.5.4). Beispiele für mögliche Inhalte und Bausteine werden in 5.5.11 gegeben.

Softwarearchitektur

Die Softwarearchitektur der Bausteine ist analog zu der GADGET.S in eine Benutzeroberfläche zur Visualisierung und Interaktion (vgl. 5.5.1) sowie je eine Schicht zur Datenverarbeitung und -speicherung gegliedert. Es können Abhängigkeiten zwischen Bausteinen untereinander auf allen drei Ebenen bestehen:

- Die **Darstellung** der Bausteine kann von anderen Bausteinen abhängig sein. Ein Beispiel dafür ist die Wahl einer passenden Bauwerksvisualisierung in Abhängigkeit des aktiven Bausteins. So kann bei Auswahl eines Taktabschnittes dieser in einer 2D-Ansicht visualisiert werden, wohingegen bei der Analyse des Fertigstellungsgrades des Bauwerks das gesamte 3D-Modell angezeigt wird.
- Die **Datenverarbeitung** eines Bausteins kann von den Inhalten und Einstellungen anderer Bausteine abhängig sein. Bspw. kann die Berechnung von Kennzahlen auf Basis ausgewählter Taktabschnitte, Gewerke und eingestellter Zeiträume durchgeführt werden.
- Auf **Datenebene** können logische Beziehungen zwischen den verschiedenen Informati onstypen vorhanden sein. Z. B. bestehen Abhängigkeiten zwischen bauwerksbezogenen Informationen, Taktabschnitten und Prozessen.

Basis der Bausteine sind Container mit vorgegebener Struktur und einem Standardfunktionsumfang, der unabhängig von den dargestellten Inhalten ist. Bausteine unterscheiden sich durch die im Inhaltsbereich aus den Datenquellen ausgelesenen Informationen. Dargestellt werden diese entweder direkt über Funktionalitäten, die im System selbst implementiert sind oder mit Hilfe eingebundener Programmzbibliotheken.

Wie bei der GADGET.S wird auch bei Bausteinen zwischen Templates (*BausteinTemplate*) und konkreten Bausteinen (*Baustein*) unterschieden. Wie in Abbildung 5-12 zu sehen ist, basieren beide auf dem Baustein-Interface *IBaustein*.

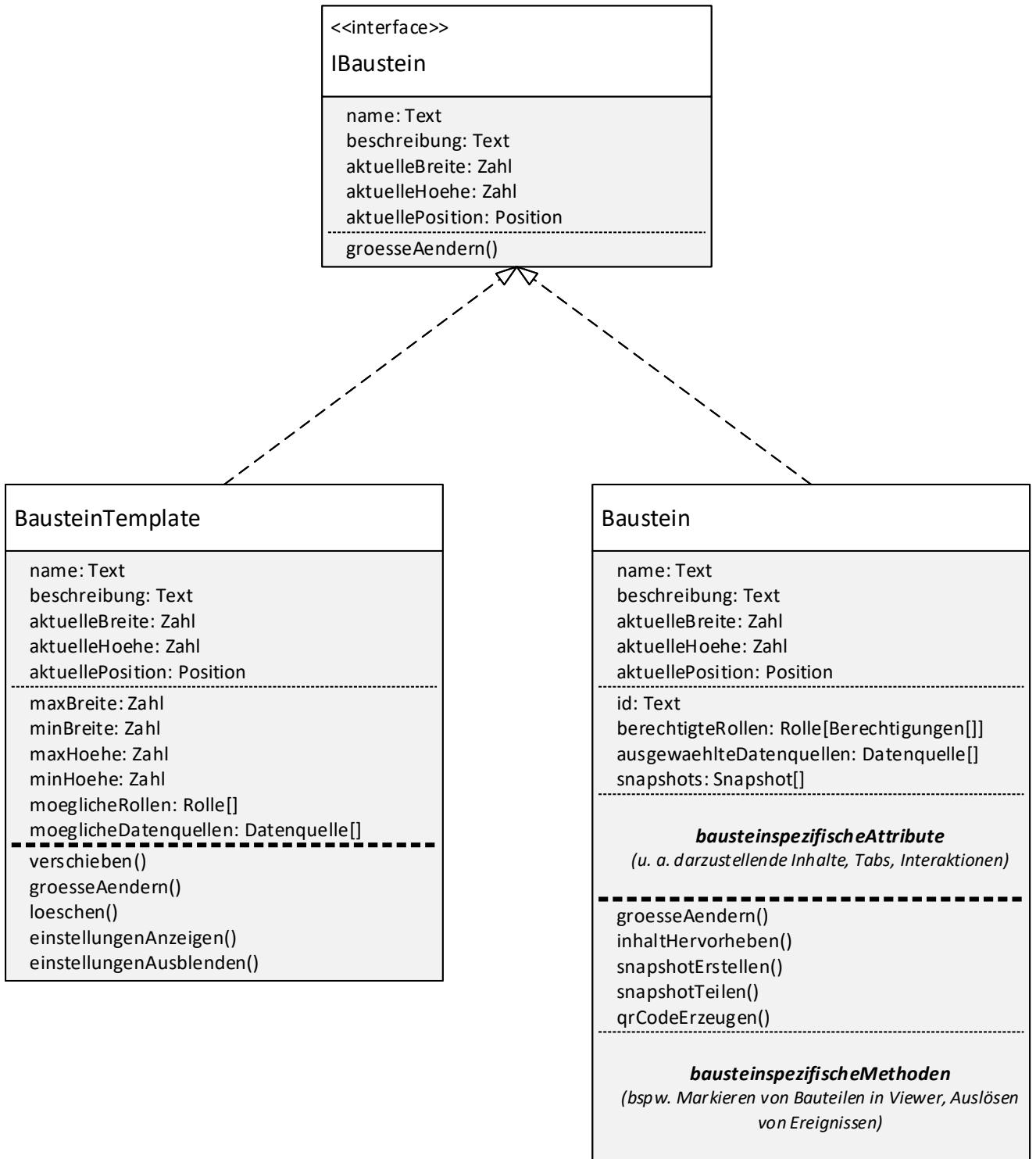


Abbildung 5-12: UML-Klassendiagramm der Struktur, Attribute und Funktionen von Bausteinen
(Eigene Darstellung nach [ISO/IEC 19505-1:2012(E), 2012])

Baustein-Templates werden bei der Erstellung von GADGET.S-Templates und Layouts genutzt. Sie können in ihrer Größe innerhalb unterer und oberer Grenzen variiert und frei auf der Oberfläche positioniert werden. Ihnen sind Rollen und Datenquellen hinterlegt, die zur Anwendung infrage kommen. Außerdem sind Methoden zum Anpassen der Darstellung vorhanden.

Zur Anzeige realer Projektinhalte im Betrieb kommen konkrete Bausteine zum Einsatz. Sie besitzen allgemeingültige Attribute und Methoden, wie bspw. Listen der hinterlegten Rollen mit gesetzten Zugriffsberechtigungen und angebundene Datenquellen. Darüber hinaus können in Abhängigkeit der anzuzeigenden Inhalte bausteinsspezifische Attribute und Methoden hinterlegt werden, die ggf. auf externe Programmbibliotheken zugreifen.

Benutzeroberfläche

In Abbildung 5-13 ist eine schematische Darstellung des Aufbaus der Benutzeroberfläche von Bausteinen gegeben. Das zentrale Element ist dabei der Inhaltsbereich in der Mitte. Analog zu der Benutzeroberfläche der GADGET.S besitzen sie eigene Funktionsleisten, jedoch ohne gesonderte Suchfelder. Der Bezeichnung vorangestellt werden darin zudem die den Bausteinen hinterlegten Datenquellen angezeigt. Die Navigation durch die Inhalte kann über *Tabs* (*Home* | *View 1* | *View 2* | *View 3*) oder *Verknüpfungen* erfolgen. Der Benutzer sieht in einer *Breadcrumb* (*Home* > *Detail Level 1* > *Detail Level 2*) seine aktuelle Position innerhalb das Bausteins.



Abbildung 5-13: Schematische Darstellung eines Bausteins (Eigene Darstellung)

5.5.3 Räumliche Einordnung und Vernetzung

Abbildung 5-14 gibt einen Überblick über die räumlichen Anordnungen der in 3.3.3 definierten Anwendungsfälle von GADGET.S. Die Funktionsbereiche sind dabei entsprechend der Definition in Abbildung 5-9 dargestellt. Um in allen Anwendungsfällen Zugriff auf die Daten von

GADGET.S zu ermöglichen, muss eine Netzwerk- resp. Internetverbindung zu dem GADGET.S - Server bestehen. Durch die Vernetzung aller Anwender und das Nutzen einer gemeinsamen Datenbasis ist sichergestellt, dass stets alle benötigten Informationen auf dem aktuellen Stand bereitstehen und auf mehreren Endgeräten gleichzeitig genutzt werden können.

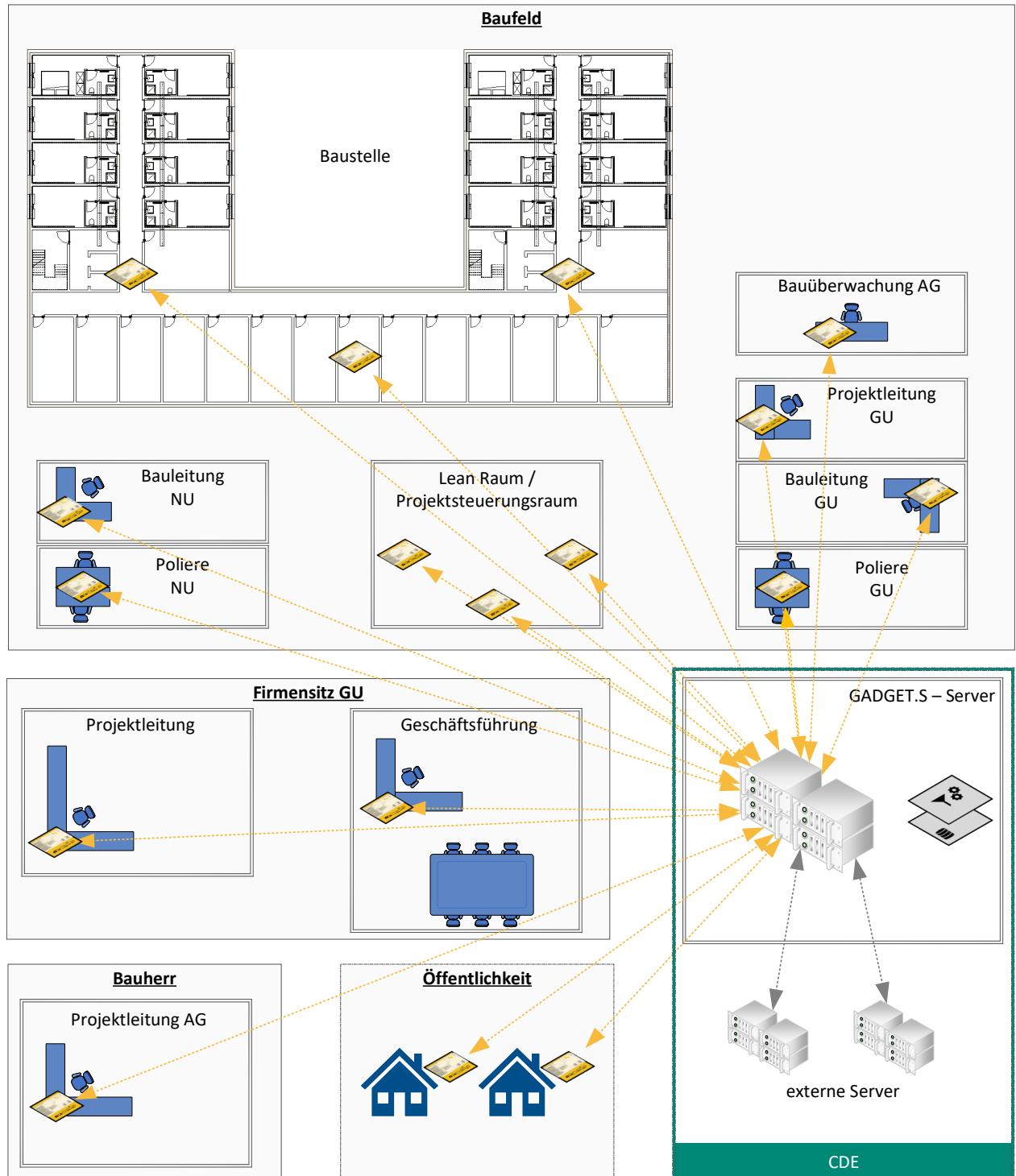


Abbildung 5-14: Räumliche Einordnung von GADGET.S auf Baustellen am Beispiel der in 5.2 beschriebenen Projektstruktur (Eigene Darstellung)

Technische Umsetzung

Aufgrund der Verteiltheit des Systems und der funktionalen Trennung werden die Funktionsbereiche nach dem Client-Server-Modell aufgeteilt und in einer webbasierten Anwendung implementiert. Diese Umsetzung ermöglicht es, unabhängig von Gerätetyp, Hardwarespezifikationen und Betriebssystem vielfältige Endgeräte zur Visualisierung, Interaktion und Datenaufnahme einsetzen zu können. Die Daten werden dabei auf zentralen Servern gespeichert, verarbeitet und bereitgestellt.

Anwendungsmöglichkeiten

Durch die Vernetzung können mehrere Instanzen von GADGET.S – im Projektsteuerungsraum sowie in allen Taktabschnitten auf der Baustelle – parallel betrieben werden. Werden Daten – bspw. bezüglich der Herstellungsprozesse, Arbeitssicherheit oder Statusbewertungen – verändert oder neu erfasst, so werden diese direkt auf allen Instanzen sichtbar. Informationen müssen somit nicht manuell und analog/digital aktualisiert werden.

5.5.4 Mehrschichtige Informationsdarstellung

Wie bei der Definition von Modellinhalten im Sinne der BIM-Methodik (vgl. 2.3.2) üblich, können die auf GADGET.S darzustellenden Inhalte in verschiedenen Detaillierungsgraden vorliegen. Um dies bei der Anwendung zu berücksichtigen, können für die einzelnen Bausteine anwendungsfallbezogen die anzuzeigenden Informationstiefen eingestellt werden. Dies ermöglicht es, den situativ angemessenen Informationsumfang darstellen zu lassen und bei Bedarf durch die Interaktionsmöglichkeiten des digitalen Systems tiefergehende Details zu ausgewählten Informationsbereichen erhalten zu können. Diese Möglichkeit, Informationen in verschiedenen Detaillierungsgraden anzeigen zu lassen, ist eine wesentliche Voraussetzung für eine übersichtliche und schnell erfassbare Darstellung des Baustellenstandes im Sinne des visuellen Managements.

Technische Umsetzung

Für den Inhaltsbereich der Bausteine können entsprechend der gewünschten Detaillierungsgrade korrespondierende Ansichten (s. Abbildung 5-13: *Detail Level*) hinterlegt werden. Die Navigation erfolgt dabei wie in 5.5.2 beschrieben über Tabs oder Verknüpfungen (Textlinks, Buttons, weitere interaktive Objekte).

Anwendungsmöglichkeiten

Ein Beispiel für einen Anwendungsfall, in dem eine mehrstufige Aufbereitung von Informationen genutzt werden kann, bilden tägliche Taktbesprechungen. Es wird zunächst ein grober Überblick über den Stand der Arbeiten auf einem abstrakten Niveau besprochen. Werden bspw.

die Ordnung, Sauberkeit und Arbeitssicherheit aller Gewerke als positiv bewertet, so sind keine detaillierten Diskussionen zu diesem Themenbereich notwendig. Liegen jedoch taktkritische Bewertungen vor, so können – ohne den Wechsel des Besprechungsortes oder des Softwaresystems – durch Auswählen des so bewerteten Gewerks / Taktabschnitts weitergehende Informationen zu den zugrundeliegenden Prozessen und zur Bewertung hinterlegte Dokumente (Fotos, Notizen, Kennzahlen etc.) detailliert betrachtet werden. Auf dieser Basis können direkt dazugehörige Ursachen und Maßnahmen zur Abhilfe besprochen werden.

5.5.5 Layouts & Templates

Layouts

Im Rahmen der Einrichtung der GADGET.S können Bausteine miteinander kombiniert und anwendungsfallspezifisch angeordnet werden. Solche Anordnungen von Bausteinen werden in Layouts zusammengefasst. Sie haben den nachfolgenden Umfang:

- Zuordnung zu einem Projekt und Anwendungsfällen
- Zusammenstellung und Anordnung (Position & Größe) von Bausteinen
- Einstellung anzugebender Detaillierungsgrade der Bausteine
- Liste zugriffsberechtigter Benutzer resp. Rollen
- Zuordnung der Berechtigungen der Benutzer (-gruppen) auf Baustein-Ebene
- Liste von Datenquellen / Software
- Empfehlung für Endgeräte zur Darstellung und Interaktion

Templates

Um bereits zusammengestellte Layouts wiederverwenden zu können, können Templates erzeugt werden. In diesen werden keine projektspezifischen Informationen hinterlegt, d. h. es werden keine konkreten Benutzer oder direkte Verknüpfungen zu externen Datenquellen hinterlegt. Jedoch können bspw. Rollen und mögliche Arten von Datenquellen zugeordnet werden, sodass bei der Nutzung eines Templates als Vorlage für ein konkretes Projekt mögliche Benutzer und Datenquellen entsprechend der Vorgaben ausgewählt werden können.

Technische Umsetzung

Die oben beschriebenen Inhalte werden in einer zentralen Datenbank gespeichert. Die in 5.6.1 beschriebene Zusammenstellung und Verwaltung der Templates und Layouts erfolgt analog zur eigentlichen Anwendung der GADGET.S in einer webbasierten Benutzeroberfläche.

5.5.6 Snapshots, Teilen und Übertragen von Informationen

Während des Betriebs von GADGET.S können die aktuellen Einstellungen und Zustände der dargestellten Inhalte aller Bausteine zwischengespeichert werden. Mit Hilfe solcher Snapshots des Systemzustandes kann die aktuelle Ansicht der gesamten GADGET.S oder einzelner Bausteine zu einem späteren Zeitpunkt oder auf einem anderen Gerät wiederhergestellt werden.

Durch die Möglichkeit, aktuelle Zustände von Bausteinen oder der gesamten GADGET.S zu beschreiben, wird es ermöglicht, aktuelle Ansichten / Snapshots von einem auf ein anderes Gerät zu übertragen. Voraussetzung dazu ist, dass die zu übertragenden Inhalte identifizierbar sind. Nach diesem Prinzip können auch ggf. noch analog vorliegende Dokumente, wie ausgedruckte Pläne, identifiziert und mit Hilfe eines passenden Bausteins (bspw. 2D-Ansichten in einem Modelviewer) dargestellt werden. Es kann dabei nach „push“ und „pull“ unterschieden werden, also danach ob Informationen durch das Teilen an eine weitere Person übermittelt (push) oder von einem Anwender gezielt angefragt (pull) werden.

Technische Umsetzung

Snapshots sind in GADGET.DB gespeicherte Verweise auf die verwendeten Bausteine mit den darin dargestellten Inhalten. In Abhängigkeit der in den Bausteinen eingesetzten Technologien können die Zustände dabei exakt oder, da nicht alle eingesetzten Programmierschnittstellen einen Zugriff auf alle zur Zustandsbeschreibung notwendigen Informationen erlauben, ggf. nur teilweise erfasst werden.

Um gezielt Inhalte von der GADGET.S auf mobile Geräte übertragen zu können, erhalten sowohl Bausteine, als auch die gesamte GADGET.S QR-Codes (pull) und die Möglichkeit zum Teilen (push) der aktuellen Ansichten der Inhalte (Snapshot) über einen entsprechenden Button in der Benutzeroberfläche. Die QR-Codes können auf mobilen Geräten mithilfe integrierter Kameras gescannt werden. Im Anschluss daran kann der hinterlegte Snapshot auf dem Gerät geladen und die GADGET.S angezeigt werden.

Anwendungsmöglichkeiten

Die Übertragung von Inhalten kann bspw. dazu genutzt werden, dass sich Teilnehmer der täglichen Taktbesprechungen Informationen, die ihren Arbeitsbereich betreffen, auf ihr Gerät übertragen, um so im Anschluss an die Besprechung nahtlos weiterarbeiten zu können. Auch können sich Poliere auf der GADGET.S einen Gesamtüberblick über den Baustellenstand verschaffen, um gezielt ausgewählte Informationen zu den anstehenden Arbeiten auf ein mobiles Gerät übertragen zu können und am Herstellungsort Details zu dem Herstellungsvorgang vorliegen zu haben.

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit ist bspw. das Versenden von Kennzahlen oder Informationen zu dem Baustellenstatus von der Bauleitung an die Projektleitung oder Geschäftsführung.

5.5.7 Mehrsprachige Nutzung

An Bauprojekten sind oft Unternehmen aus verschiedenen Ländern beteiligt, sodass besonders bei der Bauausführung Menschen verschiedener Nationalitäten vertreten sind. Im Arbeitsalltag führt dies zu Sprachbarrieren in der zwischenmenschlichen Kommunikation. Auch schriftliche Informationen liegen zumeist nur in deutscher oder ggf. in englischer Sprache vor. Somit können sie nicht immer von allen Beteiligten verstanden werden. Dies hat zur Folge, dass Informationen nicht, indirekt oder fehlerbehaftet ausgetauscht und aufgenommen werden.

Da die auf der GADGET.S dargestellten Informationen digital vorliegen, können sie in verschiedene Sprachen übersetzt werden. Die anzuzeigende Sprache kann anwenderseitig entweder manuell durch das explizite Auswählen oder automatisiert in Abhängigkeit der Spracheinstellungen des angemeldeten Benutzers vorgenommen werden.

Technische Umsetzung

Je nach Informationstyp und technologischer Implementierung der einzelnen Bausteine können bei der Übersetzung verschiedene Konzepte zum Einsatz kommen. Ein Ansatz ist die Nutzung digitaler (Fach-) Wörterbücher, wie des buildingSMART Data Dictionary (bSDD), die über Webservices die Übersetzung von Fachbegriffen aus dem Bauwesen ermöglichen [buildingSMART International, 2018]. Dies ist besonders dort wichtig, wo fachlich präzise Formulierungen notwendig sind.

Eine weitere Möglichkeit stellt die Übersetzung ganzer Textabschnitte dar. Dies kann technisch ebenfalls durch die Nutzung von Webservices direkt während der Benutzung erfolgen. Dazu stellen Anbieter von Übersetzungsdienssten Schnittstellen bereit, die sowohl zur Übersetzung von Webseiten als auch bereits in einigen Fällen von vollständigen Dateien genutzt werden können [DeepL, 2019].

Einschränkungen bestehen bei Informationen, die in Dateiformaten vorliegen, die nicht direkt oder über offene Schnittstellen lesbar sind. Beispiele dafür sind Bilder, in denen Zeichen nicht direkt interpretiert werden können oder digitale Bauwerksmodelle in proprietären Formaten. In solchen Dateien vorliegende Informationen können durch das direkte Hinterlegen der Dateien in verschiedenen Sprachen bereitgestellt werden.

Anwendungsmöglichkeiten

Die multilinguale Darstellung der Inhalte der GADGET.S bietet vielfältige Anwendungsmöglichkeiten:

- Um die **Arbeitssicherheit** zu verbessern, können Gefährdungsbeurteilungen, Montageanweisungen, Informationen zu Gefahrstoffen oder der Sicherheits- und Gesundheitsschutzplan in verschiedenen Sprachen über die GADGET.S bereitgestellt werden.
- In **Besprechungen** können die Teilnehmenden auf mobilen Geräten parallel übersetzte Darstellungen von GADGET.S nutzen, umso besser folgen zu können. Beispielsweise kann auf einem großen Monitor die Gesamtansicht in deutscher Sprache gezeigt werden, während einzelne Personen auf mobilen Geräten den aktuell diskutierten Baustein in ihrer Landessprache verfolgen.
- Arbeitskräfte können sich während der **Bauausführung** Details zu Abläufen, Materialien oder Geräten (Betriebsanweisungen und -anleitungen) anzeigen lassen.
- Auch wenn viele **Notfallinformationen** durch Piktogramme leicht verständlich sind, können Übersetzungen von Begriffen zur schnelleren Auffassung hilfreich sein.

5.5.8 Zugriffsmanagement und Identifikation

Der Lean-Ansatz basiert darauf, Wissen möglichst breit zu teilen und offen für alle zu visualisieren. Ziel ist es, eine offene Kommunikation zu pflegen, alle Beteiligten zu integrieren und zum eigenständigen und interdisziplinären Denken und Handeln anzuregen. Nichtsdestotrotz existieren vertrauliche, firmen- oder projektinterne Informationen, die nicht öffentlich und von jedem Anwender zugreifbar sein dürfen. [Fiedler, 2018b, S. 23, 68]

Daher sollen nicht alle durch die Bausteine auf der GADGET.S darstellbaren Inhalte (vgl. 5.5.11) von allen Anwendern eingesehen werden können. Um den Zugriff einzuschränken, wird ein Benutzermanagement auf Ebene der Bausteine bzw. Layouts eingerichtet, welches die Zuweisung von Rollen und Gruppen und korrespondierender Berechtigungen (Lesen / Schreiben von Informationen) ermöglicht. Diese können bei der Einrichtung des Systems projektspezifisch festgelegt und im Verlauf seiner Anwendung angepasst werden. Verknüpft mit dem Zugriffsmanagement ist die Einrichtung der Identitäten der Benutzer. Neben persönlichen Daten und dem zugehörigen Unternehmen kann auf Wunsch auch eine bevorzugte gewünschte Sprache hinterlegt werden, sodass diese bei der Nutzung des Systems automatisch eingestellt werden kann.

Technische Umsetzung

Die Art der Identifikation an der GADGET.S ist nicht fest vorgegeben. Sie kann bspw. durch personenbezogene RFID-Tags, QR-Codes oder biometrische Identifikationsverfahren umgesetzt werden. Ausschlaggebend für das zu wählende Verfahren sind vor allem das gewünschte Sicherheitsniveau sowie ggf. in Unternehmen bereits vorhandene Systeme.

5.5.9 Automatisierung

Durch die Anwendung eines digitalen Systems ist es möglich, auf Basis von Regeln vordefinierte Prozesse automatisiert ausführen zu lassen. Wie bei regelbasierten Expertensystemen (vgl. [Lunze, 2010, S. 91-129]) kann die aktuelle Datenbasis ausgewertet und so auf bestimmte Zustände des Systems reagiert werden. Dazu kann eine Überprüfung bei allen Änderungen der Datenbasis sowie bei allen Nutzereingaben erfolgen.

Anwendungsmöglichkeiten

Es können automatisch kontextrelevante Inhalte dargestellt werden, wie z. B.:

- Kurz vor Beginn festgelegter Besprechungszeiten können automatisch die dazu passenden im System hinterlegten Layouts angezeigt werden.
- Je nach Baustellenstatus können gezielt Bausteine oder wichtige Informationen – z. B. bei starken Abweichungen von Kennzahlen oder im Bereich Ordnung, Sauberkeit, Arbeitssicherheit (OSA) – hervorgehoben werden.
- Bei der Identifizierung eines Anwenders kann automatisch die hinterlegte Sprache ausgewählt und alle Inhalte entsprechend übersetzt werden.

Weiterhin können bspw. automatisch Nachrichten versendet, Daten ausgetauscht oder Kennzahlen berechnet werden.

5.5.10 Hardware

Die zum Betrieb benötigte Hardware kann entsprechend der in 5.5.1 dargestellten Funktionsbereiche aufgeteilt werden.

Visualisierung und Interaktion

Zur Benutzung der GADGET.S werden Bildschirme (Darstellung der grafischen Benutzeroberfläche) sowie Eingabegeräte (Interaktion) benötigt. Die spezifischen Hardwareanforderungen sind dabei von dem jeweiligen Anwendungsfall, den definierten Layouts und den darin verwendeten Bausteinen abhängig.

So kann zur Darstellung ggf. ein Smartphone (z. B. zur Datenaufnahme von Fotos auf der Baustelle) ausreichen, wohingegen in anderen Anwendungsfällen der Einsatz mehrerer großer Monitore oder Beamer mit großen Darstellungsflächen notwendig ist.

Die Interaktion mit dem System kann sowohl über Touch-Eingaben (gemeinsam mit der Darstellung auf Touchscreens) als auch mittels angeschlossener Eingabegeräte (Maus und Tastatur) erfolgen.

Besondere Anforderungen bestehen an im Baufeld eingesetzte Geräte. Diese müssen möglichst robust und mobil sein.

Datenaufnahme

Die Datenaufnahme soll direkt auf Endgeräten durchgeführt werden, auf denen die GADGET.S wie zuvor beschrieben dargestellt und bedient werden kann. Dies ermöglicht eine native Erfassung der Informationen im System. Erfolgt die Datenerfassung mit nicht vernetzten oder nicht webfähigen Geräten, so werden zusätzliche Schritte zur Einpflegung in das System notwendig.

Datenverarbeitung und Datenhaltung

Die Datenverarbeitung und Datenhaltung erfolgen auf handelsüblichen Server-Computern. Die Anforderungen an deren Komponenten (Systemleistung - Prozessor, Arbeitsspeicher, spezielle Chipsätze) hängen wesentlich von den verwendeten Bausteinen und dem Projektumfang (Kapazitäten des persistenten Speichers) ab.

Infrastruktur

Neben ausreichender Stromversorgung muss eine dauerhafte und möglichst ausfallsichere Netzwerk- bzw. Internetverbindung bestehen, die einen Zugriff auf den zentralen GADGET.S-Server zulässt. Dies ist bereits in vielen derzeitigen Bauprojekten in Baustellenbüros gegeben. Mit Einführung der 5G-Technologie können Verfügbarkeit, Übertragungsgeschwindigkeiten und Latenzen weiter verbessert und Webanwendungen effizienter und umfassender eingesetzt werden (vgl. [Živadinović, 2019]). So können auch Geräte im restlichen Baufeld einen Internetzugang erhalten, um bspw. eine direkte Datenaufnahme oder Besprechungen am Herstellungsort durchführen und die Daten in die zentrale Datenhaltung einpflegen zu können.

5.5.11 Bausteine und darzustellende Inhalte

Details zu einzelnen Bausteinen sind in den nachfolgenden, nach Kategorien eingeteilten Abschnitten aufgeführt. Neben einer Beschreibung der Inhalte werden mögliche Datenquellen, anwendbare Technologien und beispielhafte Gestaltungen der grafischen Benutzeroberflächen¹ aufgezeigt.

Die Inhalte sind nach Darstellungsebenen gegliedert, wobei Ebene 1 dem niedrigsten und Ebene 3 dem höchsten Detaillierungsgrad entspricht. Sind mehrere Einträge der selben Stufe vorhanden, wird je Eintrag ein *Tab* angezeigt.

Weitere Beispiele für Bausteine sind dem Anhang (s. Abschnitt A.1) zu entnehmen.

¹ Anmerkung: Die Abbildungen dienen der Veranschaulichung, sie sind abstrahiert und untereinander nicht maßstäblich.

Interaktive Bauwerksmodelle

Der Baustein *Bauwerksvisualisierung* (Tabelle 5-1, Abbildung 5-15) ist essentieller Bestandteil der GADGET.S. Er sollte möglichst zentral auf dem Bildschirm platziert werden, da er zur Anzeige verschiedener Pläne und weiterer Darstellungen von 2D- oder 3D-Ansichten des Bauwerks dient. Diese können direkt in dem Baustein ausgewählt oder durch Aktionen in anderen Bausteinen aufgerufen werden.

Tabelle 5-1: Baustein: Bauwerksvisualisierung

Ebenen / Tabs	1
Name	Bauwerksvisualisierung
Beschreibung	Darstellung von Plänen (Grundrisspläne, Ansichten, Schnitte), 2D- & 3D-Ansichten
Datenquelle(n)	beliebige digitale Modelle
zeitl. variabel	ja
Technologien / Besonderheiten	webbasiertes Modelviewer, ggf. Planserver

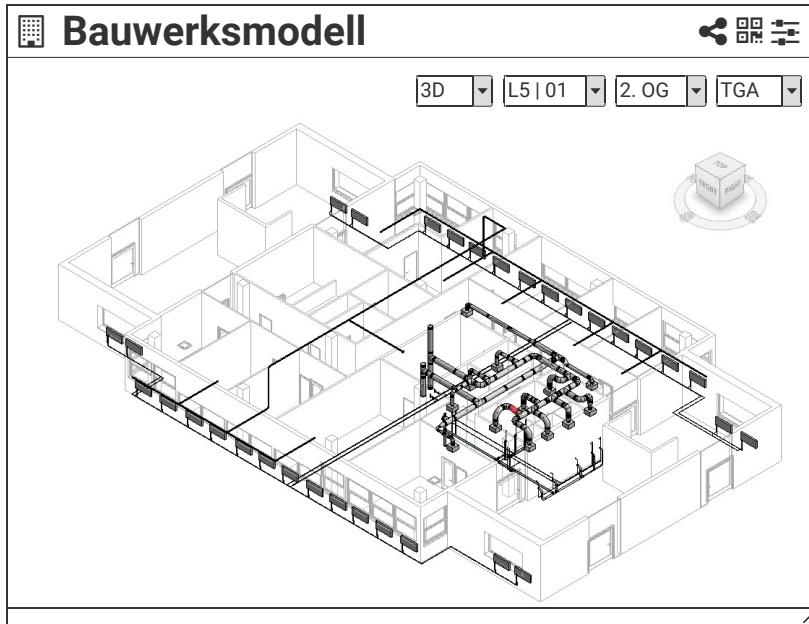


Abbildung 5-15: Baustein: Bauwerksvisualisierung (Eigene Darstellung)

Anwendungsfallabhängig werden in dem dargestellten Modell kontextsensitive Markierungen, Einfärbungen, Kommentare etc. dargestellt. Die Darstellung ist interaktiv, Inhalte und Ansichten können also von den Anwendern mittels Touchscreens / Eingabegeräten angepasst werden. Der Baustein kann in einem Layout mehrfach eingesetzt werden.

Bauablauf

Bei einer getakteten Baustelle durchlaufen die Gewerke die Taktbereiche in definierten Sequenzen. Dies wird geometrisch in dem Baustein *Bauablauf* (Tabelle 5-2, Abbildung 5-16) mittels einer auf dem Baustein *Bauwerksvisualisierung* aufbauenden 2D-Darstellung der Funktionscluster, Taktschnitte und -bereiche visualisiert.

Tabelle 5-2: Baustein: Bauablauf

Ebenen / Tabs	1	2	3
Name	Funktionscluster	Taktschnitte	Taktbereiche
Beschreibung	Visualisierung der geometrischen Anordnung der Takte, Darstellung der Baurichtung und der Gewerke		
Datenquelle(n)		LC-Modell	
zeitl. variabel	ja	ja	ja
Technologien / Besonderheiten	Nach Bedarf Darstellung von 2D- oder 3D-Ansichten in web-basiertem Modelviewer		

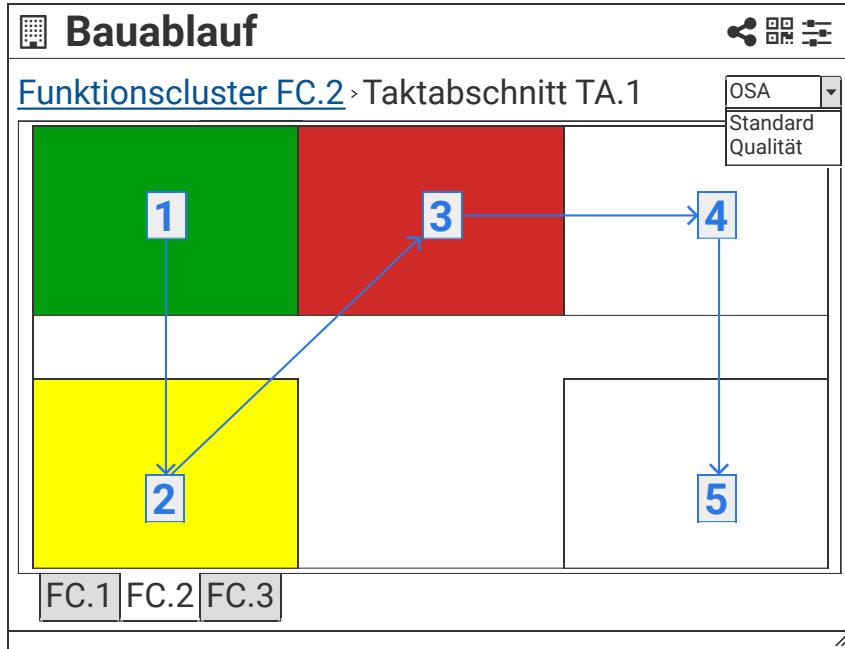


Abbildung 5-16: Baustein: Bauablauf (Eigene Darstellung)

In diesem Baustein können – verknüpft mit den Bausteinen des Bereichs *Baustellenstatus* – weiterführende Informationen zu dem aktuellen Status des jeweiligen Taktbereichs dargestellt werden. Der Bauablauf kann mittels Animation eines Bauwerksmodells innerhalb eines festgelegten Zeitintervalls veranschaulicht werden (Tabelle A-2). Die Gewerkesequenzen sind u. a. dem Taktplan (Tabelle 5-3) zu entnehmen.

Tabelle 5-3: Baustein: Interaktiver Taktplan

Ebenen / Tabs	1	2	3
Name	Übersicht & Status Taktabschnitte	Details Takt	Details Gewerke, Wochentage, Gewerk/Wochentag
Beschreibung	Darstellung der Gewerkesequenzen je TA / Takte in tabellarischer Form, integrierter Soll-Ist-Vergleich, autom. Warn- & Statusmeldungen	Aufschlüsselung der Bewertung der Gewerke in versch. Darstellungen	
Datenquelle(n)		LC-Modell, GADGET.DB	
zeitl. variabel		ja	
Technologien / Besonderheiten	Verknüpfung zwischen LC-Modell und GADGET.DB		

Prozesse, Wertschöpfung und Termine

Die Bausteine dieses Bereichs stellen Informationen zu den Herstellungsprozessen und damit verbundenen Terminen dar. Im Fokus der Darstellung steht eine übersichtliche Darstellung, so dass der Baustellenstatus schnell aufgefasst werden kann. Darüber hinaus ermöglichen sie es, durch Verknüpfungen zu anderen Informationsbereichen weiterführende Detailinformationen zu erhalten.

Wesentlich für die Steuerung einer getakteten Baustelle ist die Übersicht über die in Takte eingeteilten Herstellungsprozesse, die nach den Taktabschnitten, Taktbereichen sowie Gewerken gegliedert sind (Tabelle 5-3). Die interaktive Anzeige kann nach Bedarf auf Taktbereiche oder Gewerke angepasst werden (vgl. Abbildung 5-17, oben und Mitte). In dieser Übersicht werden die zugeordneten Taktbereiche bzw. Gewerke mit einer Ampelbewertung, in der Termintreue, Qualität, Ordnung, Sauberkeit und Arbeitssicherheit je Taktbereich und Gewerk pro Takt aggregiert in einer Ampelstufe bewertet (Abbildung 5-17, oben), dargestellt. Durch Auswählen eines Gewerks / Taktbereichs (Zeile), eines Taktes (Spalte, Abbildung 5-17, Mitte) oder einer Kombination aus Gewerk und Takt (Zelle) kann eine entsprechende Detail-Ansicht geöffnet werden, in der die Bewertungen aufgeschlüsselt werden (Abbildung 5-17, unten). Erläuterungen zu den Bewertungen werden in weiterführenden Bausteinen (Tabelle 5-6, Tabelle 5-7 und Tabelle 5-8) gegeben.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt der LC ist die Steigerung der Wertschöpfung durch Reduktion von Verschwendungen. Liegt eine fein gegliederte Prozessstruktur vor und werden die einzelnen Vorgänge hinsichtlich ihrer Soll-Wertschöpfungsverteilung bewertet, so kann durch eine Erfassung der Ist-Wertschöpfung in einem entsprechenden Baustein (Tabelle 5-4, Abbildung 5-18)

das Soll-Ist-Verhältnis visualisiert werden. Liegen keine genauen Ist-Werte vor, so können auf einem abstrakteren Niveau die Wertschöpfungsanteile aus Leistungsmeldungen oder Kennzahlen abgeleitet und ein Verlauf und Vergleich dargestellt werden.

Neben Instrumenten zur täglichen Steuerung müssen auch übergeordnete, langfristige Terminpläne sowie wichtige Meilensteine und Ereignisse einsehbar sein (Tabelle 5-5, Abbildung 5-19).

Tabelle 5-4: Baustein: Wertschöpfung

Ebenen / Tabs	2	2	1
Name	Aktuell	Soll-Ist	Verlauf
Beschreibung	Darstellung der Vergleich geplanter Wertschöpfungs-anteile (Soll) zu tatsächlichen (Ist) Wertschöpfungsanteilen	Verteilung von Wertschöpfungs- / anteile (Soll) zu tatsächlichen (Ist)	Verlauf geplanter (Soll) und tatsächlicher (Ist) Wertschöpfungsanteile
Datenquelle(n)	LC-Modell, GADGET.DB		
zeitl. variabel	ja		
Technologien / Besonderheiten	Verknüpfung zwischen LC-Modell und GADGET.DB zur Visualisierung der Wertschöpfungsanteile im Bauwerksmodell		

Tabelle 5-5: Baustein: Terminplanung

Ebenen / Tabs	1	2	3
Name	Rahmenterminplan	Generalablaufplan	Ereignisse
Beschreibung	Darstellung von Terminplänen, Meilensteinen (z. B. Prüf- / Vertragstermine) und Ereignissen, wie bspw. Besprechungen, integrierter Soll-Ist-Vergleich		
Datenquelle(n)	Terminplanungssoftware		
zeitl. variabel	ja		
Technologien / Besonderheiten	-		

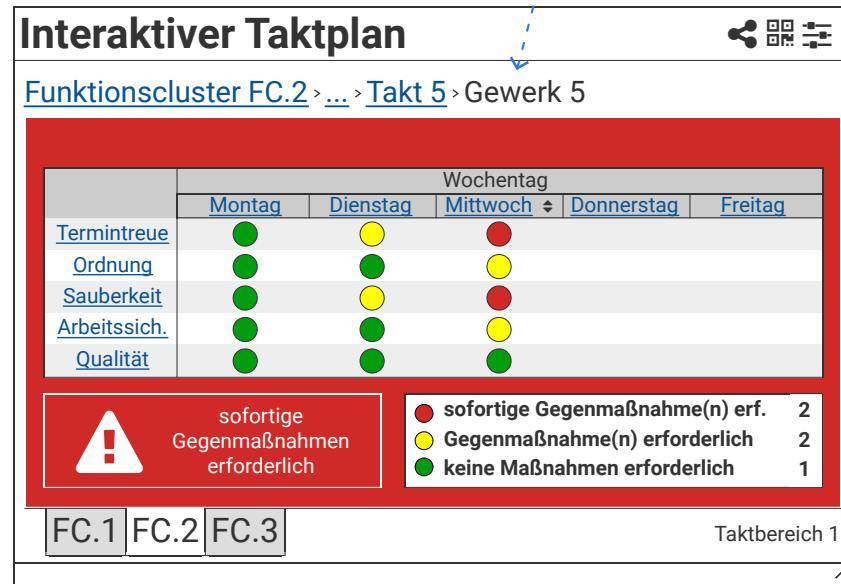
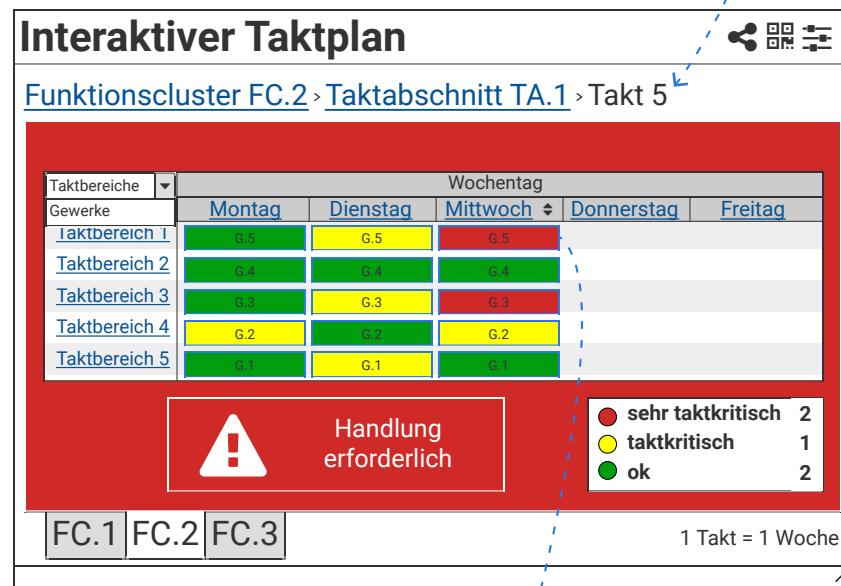
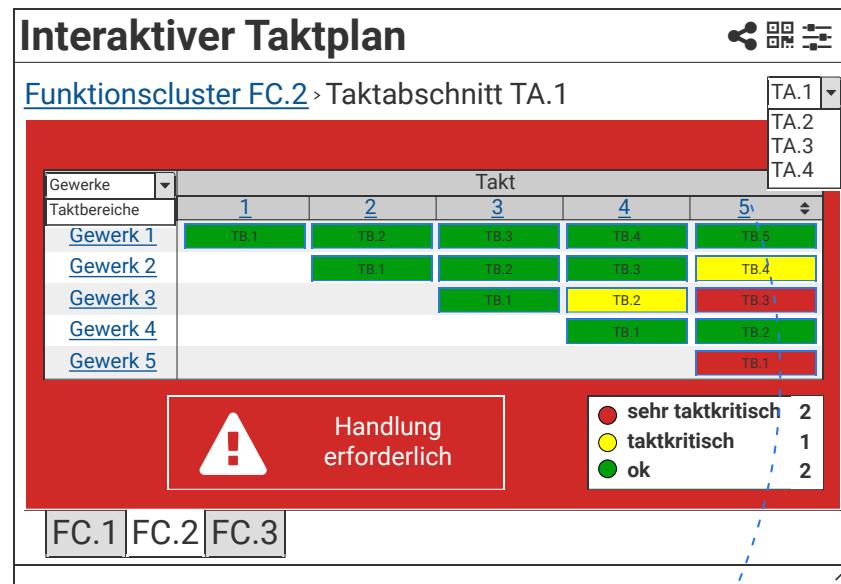


Abbildung 5-17: Baustein: Interaktiver Taktplan (Eigene Darstellung)

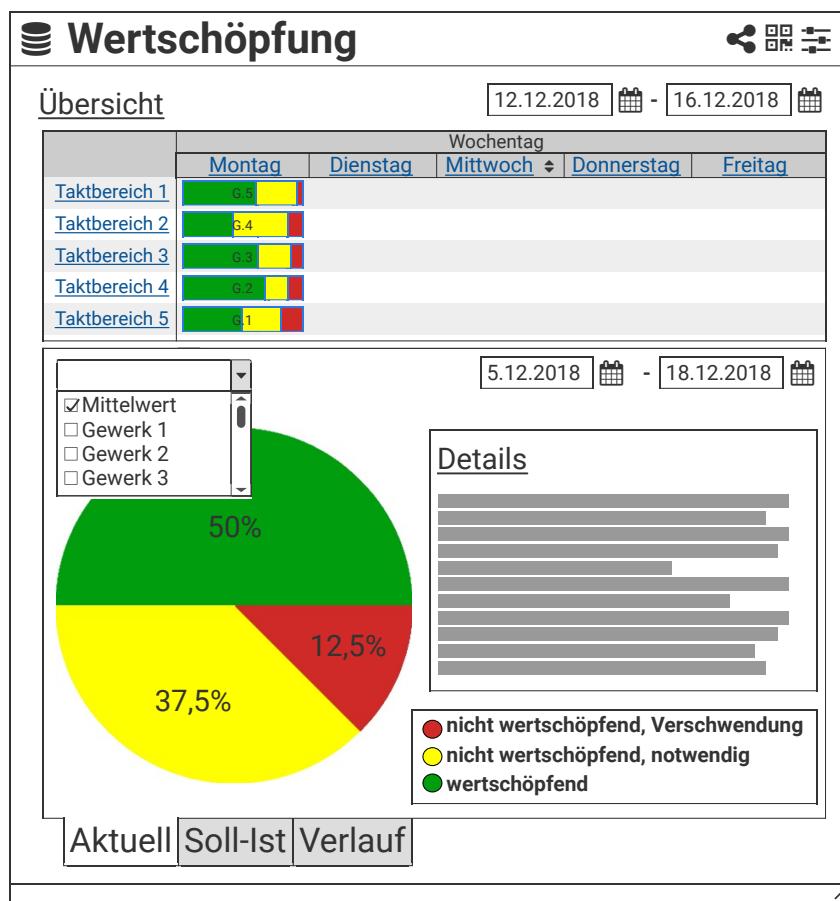


Abbildung 5-18: Baustein: Wertschöpfung (Eigene Darstellung)

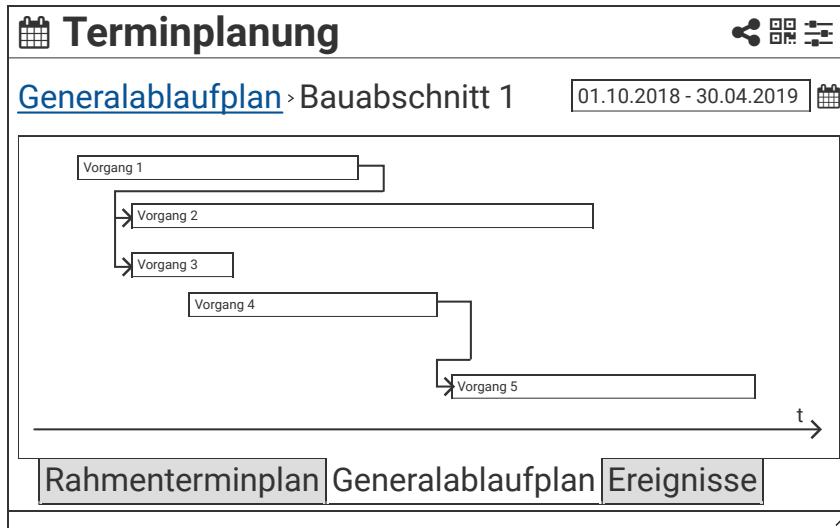


Abbildung 5-19: Baustein: Terminplanung (Eigene Darstellung)

Kennzahlen

Der in Tabelle 5-6 beschriebene und in Abbildung 5-20 dargestellte Baustein dient der Visualisierung von Kennzahlen, die aus den in der GADGET.S hinterlegten Informationen abgeleitet

werden. Er kann mehrmals und mit unterschiedlichen Zusammenstellungen von Kennzahlen eingebunden werden.

Kennzahlen sind ein zentrales Instrument zur Kontrolle und Steuerung von Projekten. Ihre Ermittlung und Visualisierung bilden die Grundlagen zur Schaffung von Transparenz auf der Baustelle. Anhand definierter Kriterien tragen Kennzahlen wesentlich zur Objektivierung der Bewertung in den verschiedenen Informationsbereichen bei. Sie bilden damit die Grundlage zur Durchführung des visuellen Managements und unterstützen eine objektive Kommunikation. Dementsprechend ist dieser Baustein ein wichtiger Bestandteil in Besprechungen des Projektstandes, bei der Berichterstattung und der Nachkalkulation.

Tabelle 5-6: Baustein: Kennzahlen

Ebenen / Tabs	ein Tab je Kennzahl
Name	<i>Abkürzung der jeweiligen Kennzahl</i>
Beschreibung	Darstellung von Kennzahlen in Abhängigkeit des ausgewählten Zeitraums, Gewerken etc.
Datenquelle(n)	GADGET.DB, Projektplattform, LC-Modell, ...
zeitl. variabel	ja
Technologien / Besonderheiten	Auflösung der Achsen entspr. Kennzahl einstellbar (Takt- oder Tageweise, 1er-, 10er-Schritte etc.), Darstellung in verschiedenen Diagrammtypen, Verknüpfungen u. a. zu Prozessen, LC-Modell, Gewerken; mehrfache Einbindung in GADGET.S möglich

Baustellen- und Projektstatus

In dieser Kategorie sind solche Bausteine eingeordnet, die Aussagen über den aktuellen Zustand der Baustelle und des Projektes geben. Sie ermöglichen die tägliche Bewertung der erbrachten Leistungen hinsichtlich Ausführungsqualität und Termintreue (Tabelle 5-7, Abbildung 5-21) sowie Ordnung, Sauberkeit und Arbeitssicherheit in den Taktbesprechungen (Tabelle 5-8, Abbildung 5-22). Die Bewertungen können durch im Vorfeld aufgenommene Daten (Fotos, Sprach- oder Textaufzeichnungen) untermauert und während der Besprechungen durch die Erfassung einer kurzen Begründung – bspw. mittels Sprache-zu-Text-Erfassung – ergänzt werden. Auch kann ein automatisch ermittelter Vorschlag zur Bewertung auf Basis im System vorhandener Informationen angezeigt werden. Die Bewertungsgrundlage kann in einer Detailansicht betrachtet werden. Der Vorschlag ist nicht bindend – die endgültige Bewertung erfolgt weiterhin durch die Besprechungsteilnehmenden. Diese Bausteine ermöglichen es zudem, im Nachgang Details und Begründungen zu den Bewertungen einzusehen. Auch können die Verläufe der einzelnen Bewertungspunkte in Diagrammen dargestellt werden.

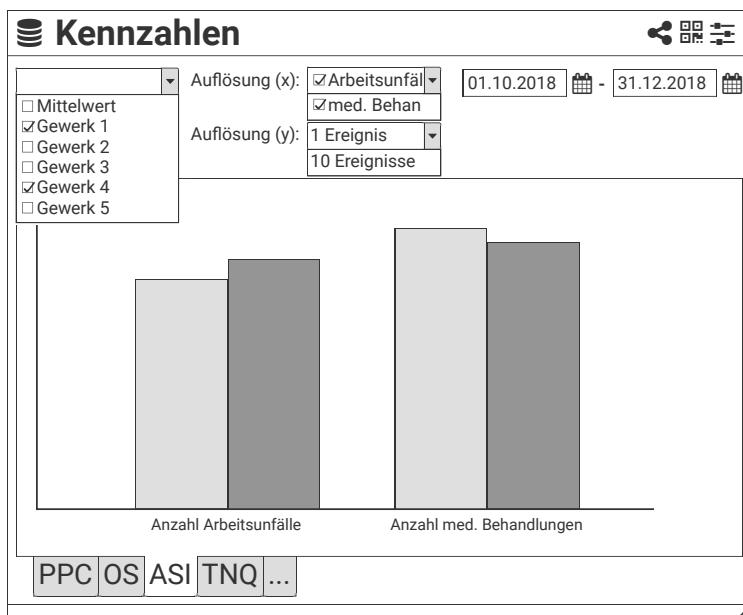
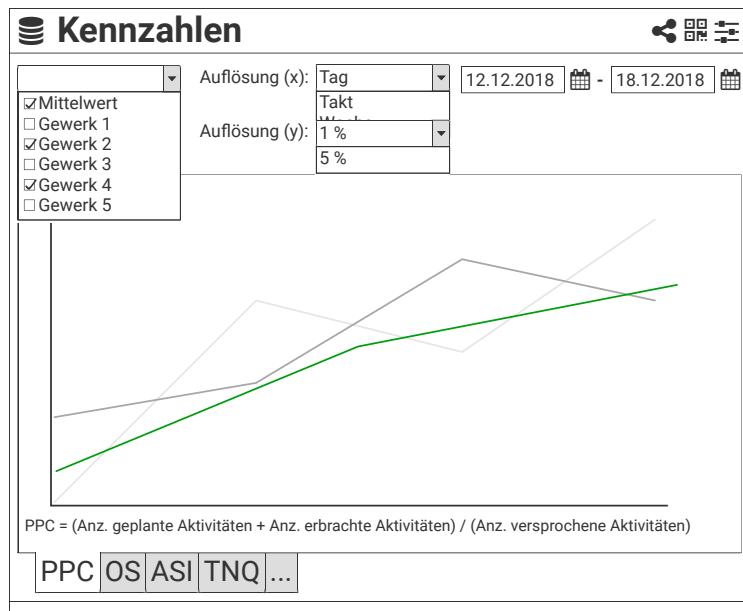


Abbildung 5-20: Baustein: Kennzahlen (PPC: Percent Plan Complete, OS: Ordnung und Sauberkeit, ASI: Arbeitssicherheit, TNQ: Teilnahmequote in Besprechungen; Eigene Darstellung)

Ein wichtiges Instrument der Projektsteuerung ist die Definition von Gegenmaßnahmen bei Abweichungen vom Soll-Zustand (Tabelle 5-9). In Maßnahmenlisten können bereits bekannte Gegenmaßnahmen gesammelt und eingesehen werden. Diese in den möglichst projektübergreifend gepflegten Listen hinterlegten Maßnahmen dienen als Vorlagen, die bei gleichen oder ähnlichen Problemen in das eigene Projekt übernommen werden können.

In einer Aktionsliste aller aktuell laufenden Maßnahmen werden neben den zugeordneten Vorgängen und Verantwortlichen auch der Umsetzungsgrad – z. B. mit Hilfe einer Viertelkreis-Bewertung – festgehalten.

Tabelle 5-7: Baustein: Qualität & Termintreue

Ebenen / Tabs	1	2	2
Name	Erfassen	Details	Verlauf
Beschreibung	Tägliche Bewertung der Qualität und Termintreue je Gewerk	Details & Begründungen zu Ampelbewertung	Diagramm über zeitlichen Verlauf nach Gewerken
Datenquelle(n)	GADGET.DB		
zeitl. variabel	ja		
Technologien / Besonderheiten	Dauerhafte Darstellung aktueller Übersicht im oberen Bereich – nach Zeitabschnitten & Gewerken zusammengefasst, Verknüpfung zu Modelviewer: Darstellung in 2D- / 3D-Ansichten des LC-Modells, Verknüpfung zu Prozessen & Datenaufnahme		

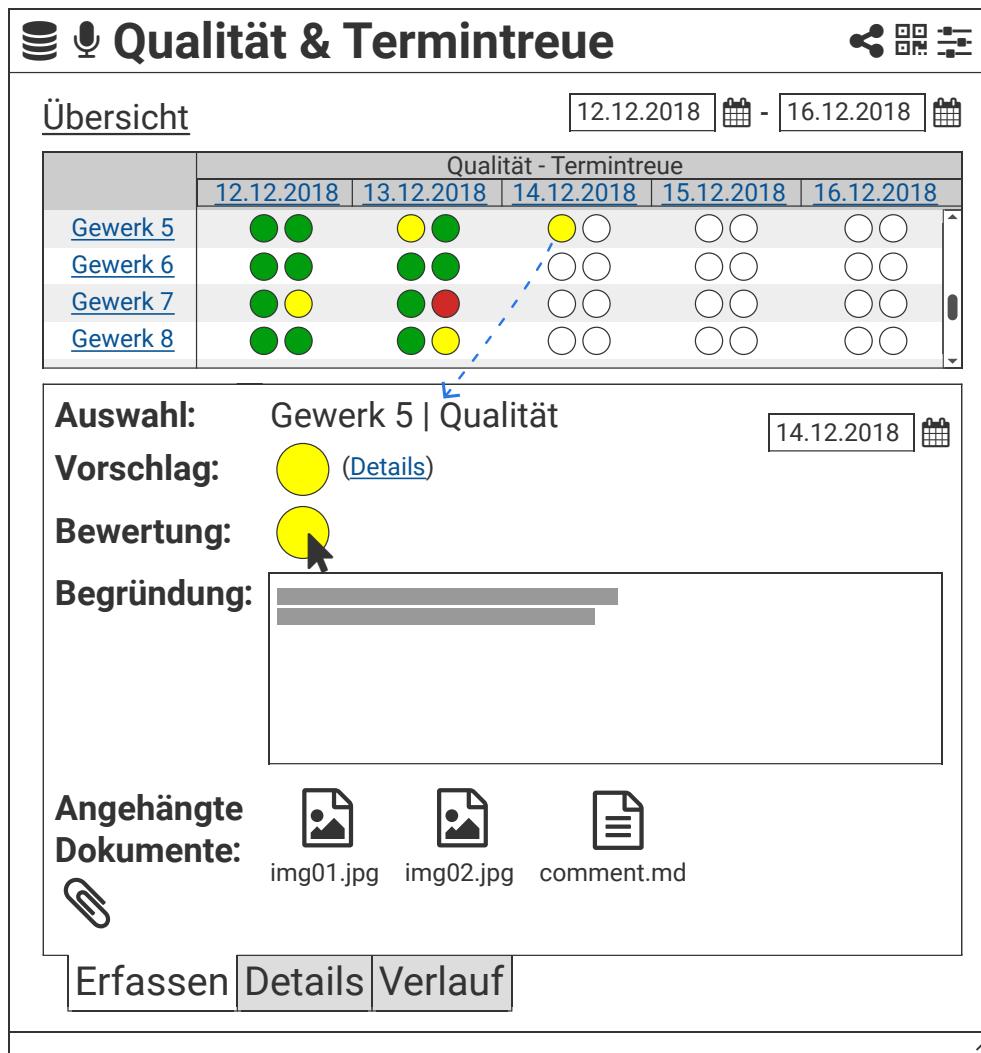


Abbildung 5-21: Baustein: Qualität & Termintreue (Eigene Darstellung)

Tabelle 5-8: Baustein: Ordnung, Sauberkeit, Arbeitssicherheit (OSA)

Ebenen / Tabs	1	2	2
Name	Erfassen	Details	Verlauf
Beschreibung	Tägliche Bewertung von O, S, A je Gewerk	Details & Begründungen zu den einzelnen Ampelbewertungen je O, S, A	Diagramme über zeitlichen Verlauf nach Gewerken je O, S, A
Datenquelle(n)		GADGET.DB	
zeitl. variabel		ja	
Technologien / Besonderheiten		Dauerhafte Darstellung aktueller Übersicht im oberen Bereich – nach Zeitabschnitten & Gewerken zusammengefasst, Verknüpfung zu Modelviewer: Darstellung in 2D- / 3D-Ansichten des LC-Modells, Verknüpfung zu Datenaufnahme	

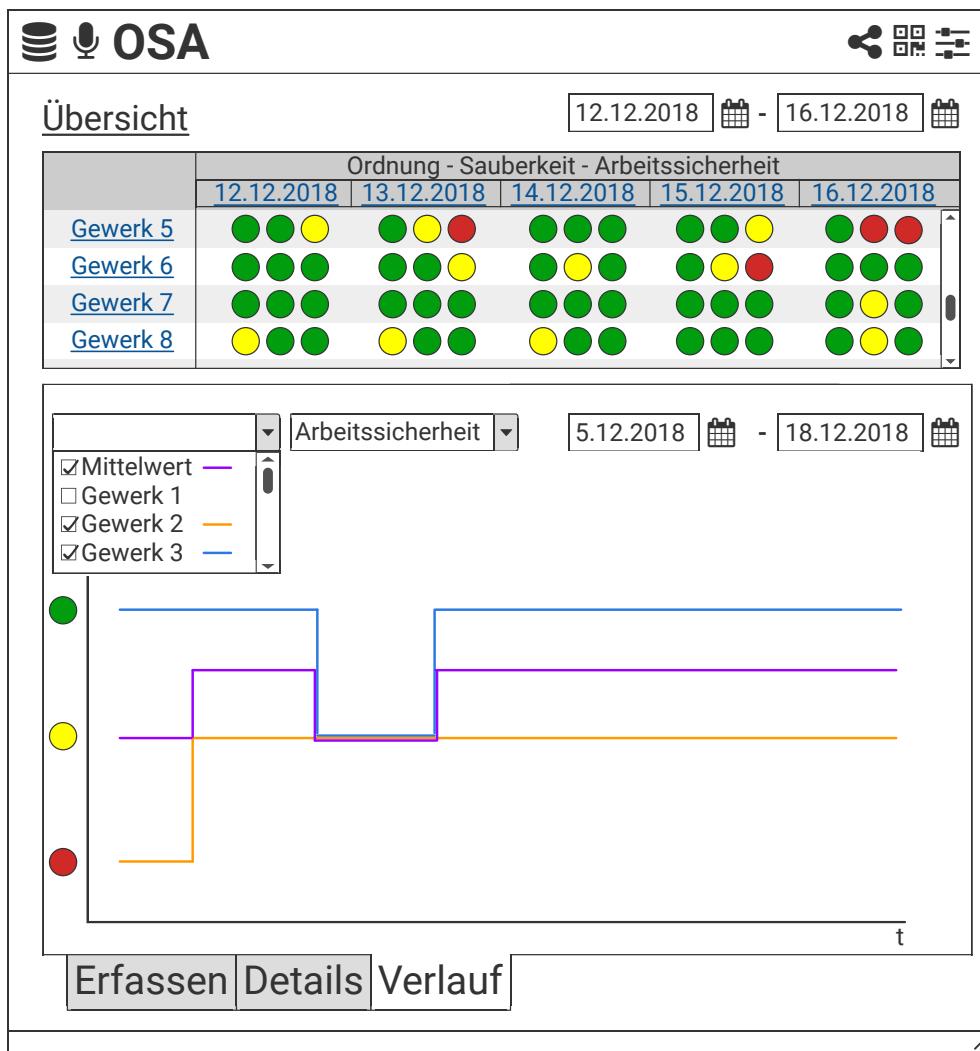


Abbildung 5-22: Baustein: Ordnung, Sauberkeit, Arbeitssicherheit (Eigene Darstellung)

Tabelle 5-9: Baustein: Gegenmaßnahmen

Ebenen / Tabs	1	1	2
Name	laufend	alle	Details
Beschreibung	Liste aller aktuell laufenden Gegenmaßnahmen	Liste aller möglichen Gegenmaßnahmen bei Abweichungen	Details ausgewählter Gegenmaßnahmen
Datenquelle(n)	GADGET.DB, Wiki		
zeitl. variabel	ja		
Technologien / Besonderheiten	Verknüpfung mit Bausteinen Taktplan, Bauablauf, OSA, Qualität, Logistik		

Logistik und Material

Um einen kontinuierlichen Herstellungsprozess zu gewährleisten, müssen die richtigen, also in den Bauprozessen benötigten, Güter (Baustoffe, Bauteile etc.), Hilfsmittel, Geräte, Personen und Informationen in der richtigen Menge, in dem richtigen Zustand, an dem richtigen Ort, zur richtigen Zeit verfügbar sein. Aufgabe der Baulogistik ist es daher, sicherzustellen, dass die Versorgung der Baustelle, Transport- und Lagervorgänge auf der Baustelle selbst sowie der Abtransport von Abfällen einer stetigen Kontrolle und Steuerung unterliegen. Die Bausteine des Bereichs Logistik und Material unterstützen die Bauleitung bei diesen Aufgaben. Sie beinhalten eine Übersicht über alle Logistikelemente auf dem Baufeld (Tabelle 5-10), wie Umschlag- und Lagerflächen samt Lagerbeständen, sowie aktuelle Übersichten von Transportvorgängen zu, auf und von der Baustelle weg (Tabelle 5-11).

Tabelle 5-10: Baustein: Logistikelemente und Lagerflächen

Ebenen / Tabs	1	2
Name	Übersicht Baustelle	Status Lagerfläche
Beschreibung	Darstellung der Logistikelemente auf der Baustelle (insb. Lagerflächen) mit ihrem Status (Ampelbewertung, abgeleitet aus Status der Lagerfläche)	Details zu einer Lagerfläche (z. B. Bestand, alle geplanten Materialien vorhanden?)
Datenquelle(n)	LC-Modell, Logistik-Modell	
zeitl. variabel	ja	
Technologien / Besonderheiten	2D-Ansicht des Bauwerksmodells	

Tabelle 5-11: Baustein: Transporte

Ebenen / Tabs	1	2	3
Name	Gesamtübersicht	Logistik-Hub bis Baustelle	Baustelle
Beschreibung	Übersicht aktueller Lieferungen und Transportvorgänge mit Verknüpfung zu einem digitalen Logistik-Modell und Anzeige der Wege		
Datenquelle(n)	Online-Kartendienste (Karte von Werk/Lager bis Baustelle)	Online-Kartendienste, digitales Logistik-Modell (Karte von Stadtgebiet und Baustelle)	LC-Modell, Logistik-Modell (Umschlagflächen, Lagerflächen etc.)
zeitl. variabel	ja		
	GPS	GPS	GPS, WLAN, RFID, autark
Technologien / Besonderheiten	Verknüpfung zu Modellviewer (LC-Modell, digitales Logistik-Modell mit Anzeige von Wegen und Flächen)		

Projekt- und Baustelleninformationen

Neben den Informationen, die die Herstellungsprozesse selbst betreffen, müssen auch allgemeine Projekt- und Baustelleninformationen dargestellt werden können. In dem Inhaltsbereich des in Tabelle 5-12 beschriebenen Bausteins können daher verschiedene Informationstypen angezeigt werden.

Tabelle 5-12: Baustein: Projekt- und Baustelleninformationen

Ebenen / Tabs	1	2
Name	Übersicht	Details
Beschreibung	Projektteilnehmer, Montageanweisungen, Erläuterungen (z. B. Ampelbewertung), Be sprechungszeiten, Baustellenversorgung, Ansprechpartner	
Datenquelle(n)	GADGET.DB, Projektplattform etc.	
zeitl. variabel	teilweise, selten	
Technologien / Besonderheiten	-	

Die Zusammenstellung der Tabs kann dabei von den Benutzern bei der Einrichtung frei gewählt werden. Wichtige Informationen, wie etwa Besprechungszeiten, Erläuterungen der Ampelbewertungen und weitere Legenden sollten kontextsensitiv angezeigt werden, wenn sie benötigt werden. Die Arbeitssicherheit betreffende Dokumente, wie Gefährdungsbeurteilungen (Tabelle 5-13), können bei Bedarf vom Benutzer abgefragt werden. Akut sicherheitsrelevante Informationen, wie Flucht- und Rettungswege, sollten ständig sichtbar sein. Aufgrund der Vielzahl darzustellender Informationen können diese Bausteine daher mehrmals in unterschiedlichen Zusammenstellungen auf der GADGET.S platziert werden.

Tabelle 5-13: Baustein: Arbeitssicherheit

Ebenen / Tabs	1	2
Name	Übersicht	Details
Beschreibung	Gefährdungsbeurteilungen, Flucht- und Rettungswege, Notfallinformationen, Sicherheitshinweise	Details zu ausgewähltem Bereich
Datenquelle(n)	GADGET.DB, Projektplattform etc.	
zeitl. variabel	teilweise, selten	
Technologien / Besonderheiten	Darstellung von Flucht- und Rettungswegen, Notfall- und Sammelpunkten in digitalen Bauwerks- und Geländemodellen in Modellviewer	

Datenaufnahme

Mit Hilfe dieses Bausteins kann eine Datenaufnahme mit direktem Bezug zu Inhalten anderer Bausteine – wie etwa ausgewählten Gewerken, Vorgängen oder Taktten – der GADGET.S erfolgen (Tabelle 5-14, Abbildung 5-23).

Tabelle 5-14: Baustein: Datenaufnahme

Ebenen / Tabs	1	1	1
Name	Foto & Video	Notizen	Sprache
Beschreibung	Mit aktuell ausgewähltem Objekt (z. B. Vorgang, Gewerk) verknüpfte Datenaufnahme		
Datenquelle(n)	Kamera	Benutzereingaben	Mikrofon
zeitl. variabel		ja	
Technologien / Besonderheiten	Durchführung z. B. mit Smartphone / Tablet, Verortung		

Dabei können die Inhalte zur Einordnung in verschiedene Kategorien, bspw. zur Erfassung von Mängeln, dem Erstellen eines Bautagebucheintrags oder der Vorbereitung einer Behinderungsanzeige dienen.

Abbildung 5-23: Baustein: Datenaufnahme (Eigene Darstellung)

Durch die direkte Zuordnung der aufgenommenen Informationen im GADGET.S-System können diese automatisiert verarbeitet und z. B. direkt im Rahmen von Besprechungen genutzt werden. Zusätzlich können Metainformationen aufgenommen werden. Die Datenaufnahmevergänge – z. B. die Aufnahme von Fotografien im Baufeld gemeinsam mit der Ausrichtung der Kamera – können mit einem Bauwerksmodell verknüpft, in diesem verortet und im Anschluss dargestellt werden.

Sonstige Bausteine

Neben inhaltsbezogenen Bausteinen werden auch Funktionen zur Bedienung (Tabelle 5-15) des Softwaresystems benötigt. Die Möglichkeit der Identifikation von Benutzern stellt eine solche dar. Sie kann in Abhängigkeit des Endgeräts bspw. durch Anmelden mit Benutzerdaten, per RFID-Chip und Passwort oder bei Vorhandensein entsprechender Scanner per Fingerabdruck oder Gesichtsscan erfolgen. Darüber hinaus kann mittels eines einfachen Bausteins anonym vom Personal angegeben werden, wie es sich fühlt (Tabelle 5-16) oder ein Wissensmanagementsystem (Tabelle 5-17) eingebunden werden.

Tabelle 5-15: Baustein: Benutzermanagement

Ebenen / Tabs	1	1	1
Name	Login	Information	Logout
Beschreibung	Login über UserID / RFID-Tag und Passwort, Gesichtsscan, Fingerabdruck	Identität des einge-loggten Benutzers anzeigen	Abmelden Button
Datenquelle(n)		GADGET.DB	
zeitl. variabel		ja	
Technologien / Besonderheiten	RFID- / Gesichts- / Fingerabdruckscanner zur Identifikation	-	-

Tabelle 5-16: Baustein: Stimmungsbarometer

Ebenen / Tabs	1
Name	Stimmungsbarometer
Beschreibung	Anonyme Abstimmung über Befinden aller Personen auf der Baustelle
Datenquelle(n)	GADGET.DB
zeitl. variabel	ja
Technologien / Besonderheiten	-

Tabelle 5-17: Baustein: Wissensmanagement

Ebenen / Tabs	1
Name	Wiki
Beschreibung	Plattform, auf der Informationen baustellenübergreifend nachgeschlagen werden können
Datenquelle(n)	Wiki
zeitl. variabel	ja
Technologien / Besonderheiten	-

Beispielhafte Zusammenstellungen der erweiterten digitalen Taktsteuerungstafel

In Abbildung 5-24 und Abbildung 5-25 sind schematisch beispielhafte Zusammenstellungen von Bausteinen zu GADGET.S Layouts dargestellt.

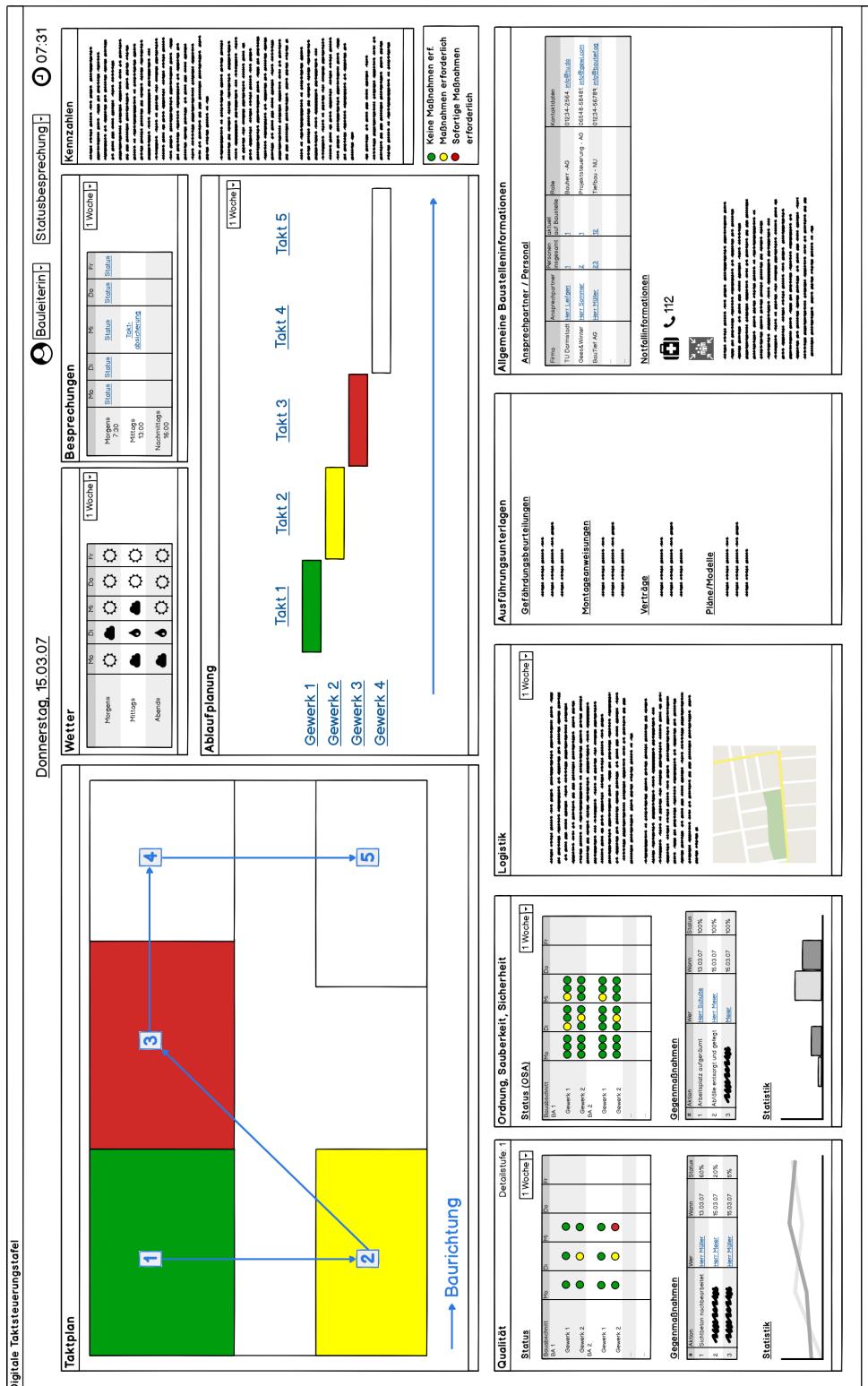


Abbildung 5-24: Schematische Anordnung von Bausteinen eines GADGET.S Layouts - Beispiel 1 (eigene Darstellung)

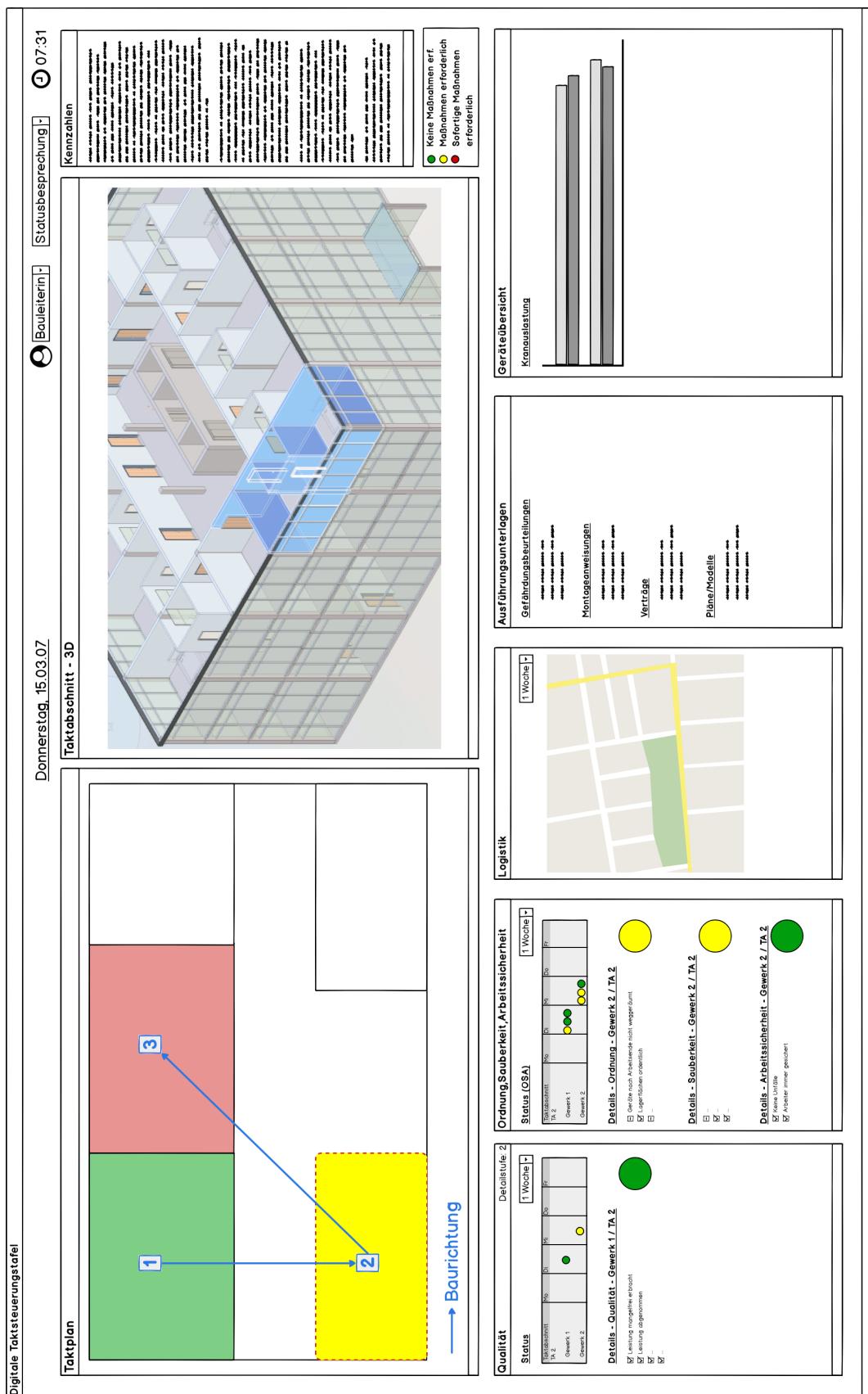


Abbildung 5-25: Schematische Anordnung von Bausteinen eines GADGET.S Layouts - Beispiel 2 (eigene Darstellung)

5.6 Anwendung der ganzheitlichen digitalen erweiterten Taktsteuerungstafel in Projekten

Die Anwendung der GADGET.S ist in fünf in Abbildung 5-26 dargestellte Schritte gegliedert.

Im Rahmen der Ausführungsvorbereitung werden in Absprache aller Beteiligter die projektrelevanten Anwendungsfälle der GADGET.S ermittelt und strukturiert festgehalten (I).

Auf dieser Basis können – falls vorhanden – korrespondierende Layouts aus bereits vorhandenen Templates geladen (II) und im Anschluss angepasst oder neu zusammengestellt (III) werden. In Abhängigkeit der an den Anwendungsfällen beteiligten Anwender (Projektrollen), einzusetzender Software und möglicher Datenquellen werden passende Bausteine vorgeschlagen. Angepasste oder neue Layouts können als Templates gespeichert und Projekten zugeordnet werden. Dabei werden projektspezifische Informationen, wie zur Verfügung zu stellende Sprachen, einzusetzende Endgeräte sowie Aufstellungsorte der GADGET.S hinterlegt. Auch können bereits in diesem Schritt Berechtigungen für bestimmte Anwendergruppen sowie darzustellende Detaillierungsgrade festgelegt werden.

Zu Beginn der Ausführungsphase werden zu den vorab definierten Layouts konkrete Informationen hinterlegt. Insbesondere müssen Angaben zu Benutzern und Datenquellen gemacht werden (IV). Überdies können die ausgewählten Bausteine angepasst und benötigte Sprachen hinzugefügt werden.

Im Anschluss daran kann die GADGET.S produktiv im Projektalltag genutzt werden (V). Von der Ermittlung der Anwendungsfälle bis zum Betrieb in der Ausführungsphase findet dabei ein stetiger bidirekionaler Informationsaustausch zwischen dem BAP und der GADGET.S statt. Ausgenommen davon ist das Auswählen und Speichern von Templates, da diese nicht projektspezifisch sind und daher nicht im BAP erfasst werden.

Anpassungen im Betrieb (I bis V)

Mit ihren dynamischen, komplexen Strukturen sind Projekte stetigen Veränderungen und Anpassungen ausgesetzt. Hinsichtlich GADGET.S sind dabei besonders Änderungen an der Zusammensetzung der Projektbeteiligten sowie bei dem Einsatz von Software (Anwendungsfälle, Softwareanwendungen, Datenformate, Anforderungen an Modellinhalte) und Hardware (bspw. Kompatibilitätsprobleme bei der Einbindung neuer Geräte) relevant. Wie in Abbildung 5-26 dargestellt, handelt es sich bei den beschriebenen Schritten zur Anwendung von GADGET.S um einen Zyklus, der mehrmals durchlaufen werden kann. Dieser Ansatz erlaubt es, Änderungen an bestehenden oder das Hinzufügen neuer Layouts während der Ausführungsphase durchzuführen.

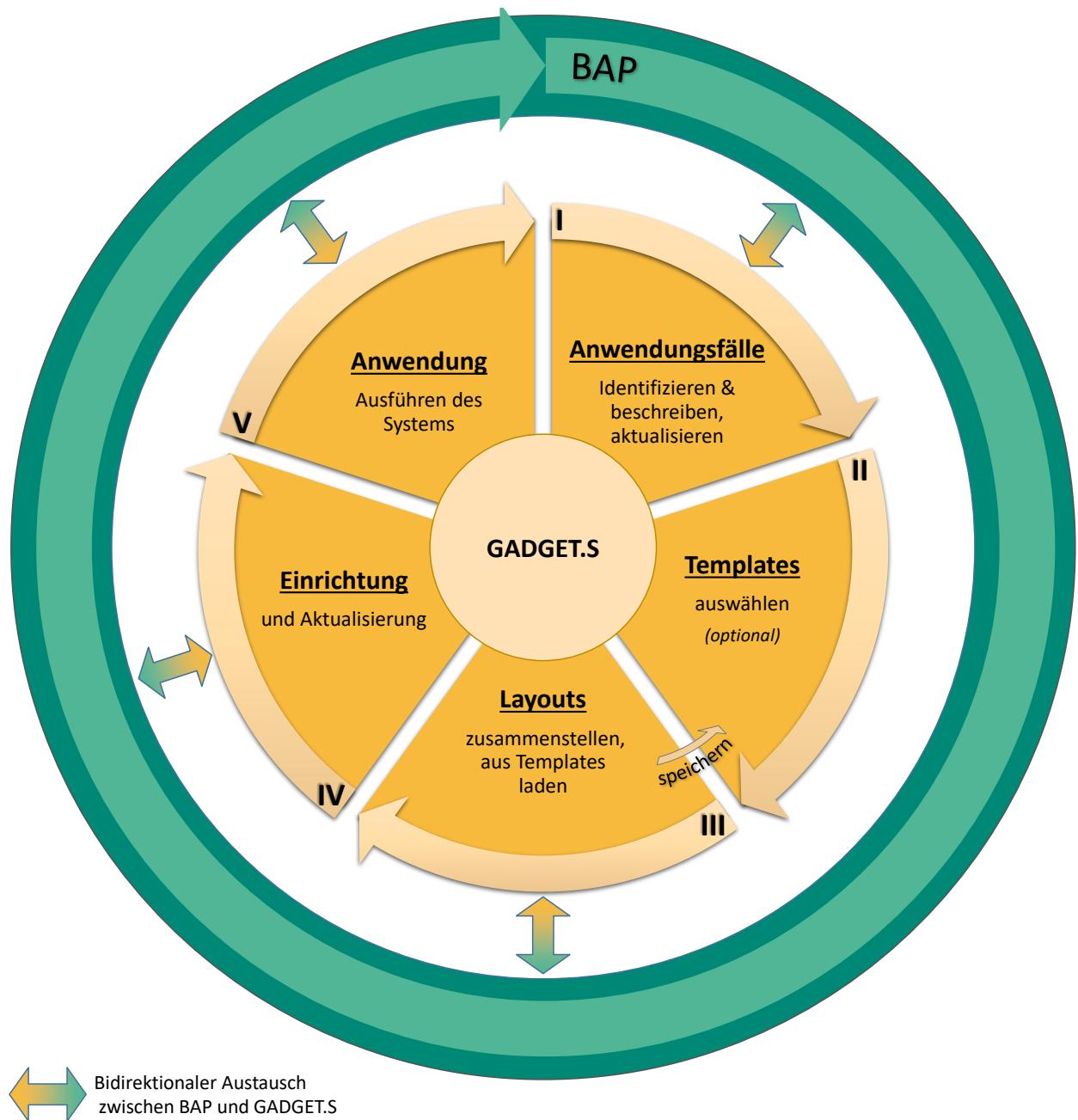


Abbildung 5-26: Zyklus der Anwendung von GADGET.S (Eigene Darstellung)

5.6.1 Zusammenstellung von Layouts und Templates

Der hohe Grad an Individualisierbarkeit der GADGET.S ermöglicht es, sie individuell an Projekt- sowie Unternehmensstrukturen anzupassen. Es ist damit gleichermaßen die Herausforderung verbunden, dass ihre Gestaltung und Einrichtung komplex werden kann. Daher wird im Folgenden ein Vorgehen dazu definiert, welche Schritte durchlaufen werden müssen, um den Einrichtungsprozess möglichst effizient zu gestalten und so eine Integration in bestehende Arbeitsabläufe praktikabel zu machen. Die Einrichtung sollte gemeinsam in Absprache aller Projektbeteiligten erfolgen.

Abbildung 5-27 zeigt den Prozess zur Zusammenstellung von Layouts. Dieser kann entweder mit einem komplett neuen Layout begonnen oder auf Basis eines vorhandenen Templates durchgeführt werden. In den Schritten A.1 bis A.4 werden allgemeine Informationen und Details zu den zu nutzenden Endgeräten mit ihren Displays sowie die beteiligten Rollen und mögliche Datenquellen erfasst. Diese Schritte können in beliebiger Reihenfolge durchlaufen werden, da sie nicht direkt voneinander abhängen. Auf Basis der so gesammelten Informationen werden alle Bausteine herausgefiltert, die unter den gegebenen Randbedingungen nicht anwendbar sind. Dies betrifft vor allem solche Bausteine, für die keine passenden technologischen Voraussetzungen, Rollen oder Datenquellen gegeben sind.

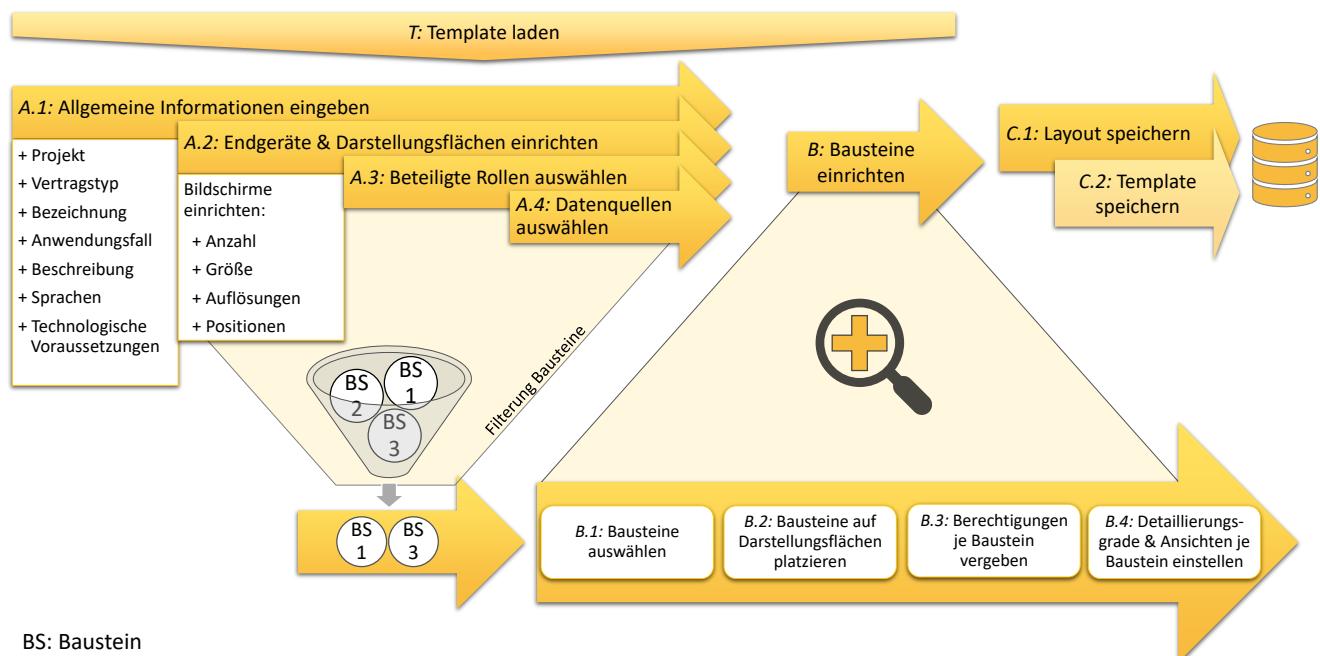


Abbildung 5-27: Zusammenstellung von Layouts und Templates mit GADGET.S; Schritte T u. C.2 optional (Eigene Darstellung)

Im Anschluss folgen die Auswahl und Einrichtung der Bausteine. Aus der Menge der zuvor ermittelten Bausteine können nach Bedarf beliebige – ggf. mehrfach – ausgewählt (B.1) und auf den definierten Darstellungsflächen platziert (B.2) werden. Für jeden Baustein können dann individuell auf Basis der zuvor ausgewählten Rollen Zugriffsberechtigungen (B.3) vergeben sowie die darzustellenden Detaillierungsgrade und Standard-Ansichten (B.4) festgelegt werden. Abschließend kann das erstellte Layout projektbezogen gespeichert (C.1) und bei Bedarf als projektunabhängiges Template (C.2) hinterlegt werden.

5.6.2 Einrichtung zu Beginn der Ausführungsphase und Aktualisierungen

Zu Beginn der Ausführungsphase erfolgt die Einrichtung der GADGET.S für ein spezifisches Projekt. Dabei können zuvor definierte Bausteine konkretisiert und in gemeinsamer Absprache

an die Bedürfnisse aller Beteiligten angepasst werden. Dazu müssen Informationen zu Personen (Name, Logindaten, Unternehmen, Rolle, Sprache etc.) und den Datenquellen der Bausteine (Webservices, wie bspw. Gebäudemodellserver, Schnittstellen zum CDE und anderen Diensten) in der GADGET.S hinterlegt werden. Bei Eingaben und Änderungen wird stets auch der BAP (automatisiert) aktualisiert. Auch können bestehende Layouts während des Projektverlaufs an veränderte Randbedingungen angepasst werden.

5.6.3 Nutzung in den Anwendungsfällen während der Ausführungsphase

Die Art der Nutzung der GADGET.S variiert entsprechend der unterschiedlichen Anwendungsfälle stark. Am Beispiel des Projektsteuerungsraums wird deutlich, dass je nach Kontext verschiedene Zusammenstellungen von Layouts der GADGET.S gemeinsam in einem Anwendungsfall genutzt werden können: In Projektsteuerungsräumen können mehrere Touchscreens zu Gruppen zusammengefasst im Raum verteilt angebracht werden. Jede dieser Gruppen kann dabei ein sich über mehrere Bildschirme erstreckendes Layout darstellen. In Abbildung 5-28 sind beispielhaft die vier in [Verein deutscher Ingenieure, 2019, Bild B1, S. 76] genannten Informationsbereiche dargestellt. Diese werden standardmäßig gemäß des Anwendungsfalls *Informationsbasis* angezeigt. Wird in dem Projektsteuerungsraum eine *tägliche* oder *wöchentliche stattfindende Taktbesprechung* durchgeführt, können entsprechende Layouts geladen und besprechungsrelevante Inhalte dargestellt werden.

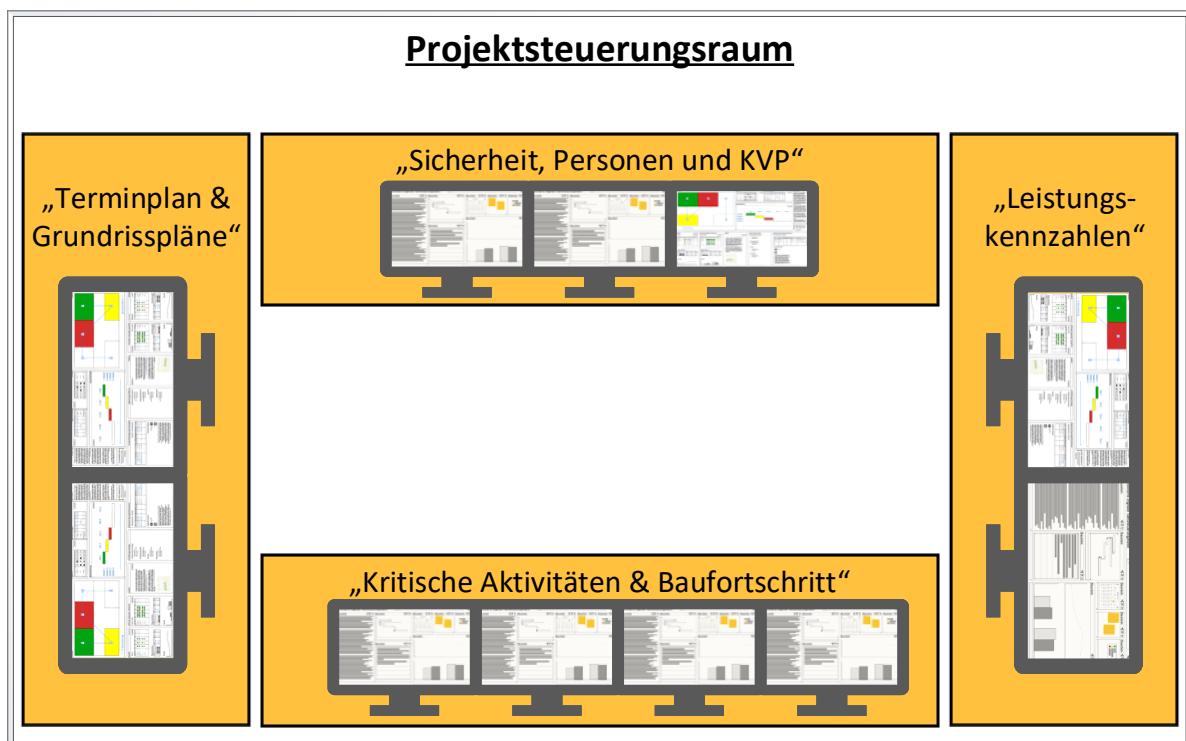


Abbildung 5-28: Projektsteuerungsraum mit vier Layouts der GADGET.S für den Anwendungsfall der täglichen Taktbesprechung (Eigene Darstellung)

Zuordnung von Bausteinen zu Anwendungsfällen

In Tabelle 5-18 und Tabelle 5-19 sind Vorschläge für den Einsatz der einzelnen Bausteine in verschiedenen Anwendungsfällen gegeben. Die tatsächliche Auswahl und Nutzung erfolgt gemäß dem zuvor beschriebenen Vorgehen aufbauend auf projektspezifischen Definitionen sowohl der Anwendungsfälle, als auch derer Implementierung.

Tabelle 5-18: Zuordnung von Bausteinen zu Anwendungsfällen (x: ja, (x): ggf.)

Bausteine	Anwendungsfälle									
	tägl. Taktbesprechung	wöchentl. Taktbesprechung	Informationsbasis	Informationserfassung	Berichterstattung	Nachkalkulation	Dokumentation	Öffentlichkeitsarbeit	Schulungen	
Interaktive Bauwerksmodelle										
Bauwerksvisualisierung	x	x	x	(x)	(x)	(x)	x	x	x	
Kollisionsprüfungen	(x)	x	(x)		(x)		x		x	
Bauablauf										
Bauablauf	x	x	x		x	x	x	(x)	x	
Animation Bauwerksherstellung	(x)	x	x		(x)	x	x	x	x	
Prozesse und Termine										
Interaktiver Taktplan	x	x	x	x	x	x	x		x	
Wertschöpfung	x	x	x		x	x	x		x	
Terminplanung	x	x	(x)		x	x	x		x	
Kanban Board	x	x	(x)	x			x		x	
Kennzahlen										
Kennzahlen	x	x	(x)		x	x	x	(x)	x	
Baustellen- und Projektstatus										
Qualität & Termintreue	x	x	(x)	x	x	x	x		x	
Ordnung, Sauberkeit, Arbeitssicherheit	x	x	(x)	x	x	x	x		x	
Gegenmaßnahmen	x	x	x	(x)	x	x	x		x	

Tabelle 5-19: Zuordnung von Bausteinen zu Anwendungsfällen (Fortsetzung, x: ja, (x): ggf.)

		Anwendungsfälle								
		tägl. Taktbesprechung	wöchentl. Taktbesprechung	Informationsbasis	Informationserfassung	Berichterstattung	Nachkalkulation	Dokumentation	Öffentlichkeitsarbeit	
Bausteine										
Logistik und Material										
	Transporte	(x)	x	x	x	x	x	x	x	
	Logistikelemente und Lagerflächen	(x)	x	x	x	x	x	x	x	
Projekt- und Baustelleninformationen										
	Projekt- und Baustelleninformationen	(x)	x		x	x	x	(x)	x	
	Arbeitssicherheit			x			x		x	
	Live-Übertragung	(x)	(x)	x				x	x	
	Wetter	x	(x)	x	x	x	x	x	x	
	Stimmungsbarometer	x	(x)	x	x	x	x	x	x	
	Wissensmanagement	(x)	(x)	x	x	x	(x)	x	x	
Datenaufnahme										
	Datenaufnahme		x	x	x			x	x	
Bedienung										
	Benutzermanagement		x	x	x	x	x	x	x	

5.6.4 Einbindung in BIM-Strukturen

Grundlage für den Einsatz von Software in Projekten sind Vereinbarungen und Definitionen zur Art und Weise der Nutzung zwischen allen Projektbeteiligten – sowohl auf technischer, organisatorischer, juristischer, als auch auf Prozessebene. Je nach Projektstruktur und -beteiligten können dazu Inhalte in verschiedenen Dokumenten, wie etwa einem BIM-Pflichtenheft, definiert werden. Auch Vertragsdokumente (BIM-Bauvertrag, Anlagen zu anderen Verträgen oder BIM-Leistungsbeschreibungen) können separat davon geführt werden [DB Station&Service AG & DB Netz AG, 2018, S. 26]. Im Kontext der BIM-Methodik stehen stets die in den AIA definier-

ten Vorgaben des AGs sowie der BAP, in dem diese auftragnehmerseitig umgesetzt werden, im Mittelpunkt [Liebsch u. Sautter, 2018, S. 2].

Zur Einordnung der GADGET.S in den BIM-Kontext können die üblichen Strukturen von BAPs, wie die Definitionen von BIM-Zielen, BIM-Anwendungsfällen und LoI, genutzt werden. Darüber hinaus können GADGET.S-spezifische Inhalte, wie Zuordnungen einzusetzender Bausteine zu Anwendungsfällen (analog zu Tabelle 5-18 und Tabelle 5-19), anzubindende Datenquellen sowie Layouts in einem separaten Dokument festgehalten werden. Es ist dabei projektspezifisch abzugrenzen, ob alle oder nur solche Festlegungen mit Bezug zu digitalen Bauwerksmodellen zur Anwendung der GADGET.S in dem BAP oder in einem separaten Dokument erfasst werden.

Datenabgleich zwischen GADGET.S und BAP

Werden die Inhalte des BAPs nicht in Form eines Textdokuments, sondern auf Basis eines strukturierten Datenmodells hinterlegt, ermöglicht dies einen (semi-) automatisierten, bidirektionalen Datenabgleich zwischen dem BAP und der GADGET.DB. Wie in Abbildung 5-26 dargestellt, können dadurch Definitionen von Rollen, Anwendungsfällen, LoI, Bausteinen und Layouts zwischen beiden Systemen ausgetauscht werden und müssen somit nicht mehrfach durchgeführt und manuell übertragen werden. Zur Einordnung des BIM-Bezugs können insb. die in den Bausteinen verwendeten Datenquellen herangezogen werden. Im Sinne des Lean-Ansatzes wird so eine weniger fehleranfälliger und effizientere Arbeitsweise gefördert.

Einordnung von GADGET.S in BAP

Basierend auf [Liebsch u. Sautter, 2018] ist in Tabelle 5-20 und Tabelle 5-21 ein Vorschlag für die Einordnung der GADGET.S sowie des LC-Modells in einen BAP dargestellt.

Tabelle 5-20: Einordnung von GADGET.S in eine BAP-Struktur nach [Liebsch u. Sautter, 2018]
Abschnitt BAP **Inhalt GADGET.S**

Abschnitt BAP	Inhalt GADGET.S
2.4 Projektbeteiligte	Austausch möglicher Rollen und Anwender der GADGET.S
2.5 Projektphasen und Meilensteine	Festlegung der Meilensteine zur Einrichtung und Anwendung von GADGET.S und des LC-Modells (vgl. 5.1)
3.1 BIM-Ziele des Auftraggebers	Festlegung der Nutzung von BIM-Modellen zur Taktsteuerung
3.2 Übergeordnete Zielsetzung	Ziel: Projektdurchführung nach LC-Ansätzen
4.1 BIM-Projektorganigramm	Ergänzung um LC-spez. Rollen, wie LC-Management oder BIM-Koordinator LC
4.2 BIM-Projektbeteiligte	Ergänzung um BIM-Koordinator LC

**Tabelle 5-21: Einordnung von GADGET.S in eine BAP-Struktur nach [Liebsch u. Sautter, 2018]
(Fortsetzung)**

Abschnitt BAP	Inhalt GADGET.S
4.3 Übersicht der Zuständigkeiten	Entsprechend 4.1 und 4.2 ergänzen
4.4 Phasen- und rollenbezogener Leistungsumfang	Entsprechend 4.1 und 4.2 Leistungen ergänzen: BIM-Koordinator LC (z. B. Pflege LC-Modell, Einrichtung GADGET.S, Einbindung Datenquellen, Koordination Infrastruktur etc.)
5.1 BIM-Modellanwendungen nach Phasen	Kategorie „Prozessunterstützende Anwendungen“ um LC / „digitale, modellbasierte Taktsteuerung“ ergänzen (vgl. 5.1)
5.2 Meilensteine für den Informationsaustausch	Ergänzung um LC-Modell
5.3 Detaillierung der Modelle nach Meilensteinen	Ergänzung um LC-Modell
5.4 Modellstrukturen	An LC-Anforderungen anpassen (Bauabschnitte, Funktionscluster, Taktabschnitte und -bereiche)
5.6 Modell Element Matrix	Ergänzung um LC-spezifische Zuständigkeiten
6.2 Kollaborationssysteme	Ergänzung um GADGET.S
6.7 Projektsoftware	Ergänzung um GADGET.S
6.9 Datenlieferungsplan	Ergänzung um LC-Modell
6.10 BIM-Prozesse	Prozess „digitale, modellbasierte Taktsteuerung“ detailliert beschreiben
6.11 Training	Ergänzen um Training in Umgang mit GADGET.S
7 Koordination	Abgleich Koordinationsmodell mit LC-Modell



6 Implementierungen zur Verifizierung der technischen Umsetzbarkeit

Das in Kapitel 5 beschriebene Konzept einer ganzheitlichen, digitalen, erweiterten und BIM-basierten Taktplanung und -steuerung baut auf dem Einsatz einer Kombination verschiedener Softwareanwendungen sowie der Verwendung digitaler Bauwerksmodelle – im Speziellen des in dieser Arbeit vorgestellten LC-Modells – auf. In den folgenden Abschnitten wird anhand ausgewählter Beispiele gezeigt, dass dessen Implementierung softwaretechnisch möglich ist und Softwarelösungen bestehen, die – zusammengeführt und angepasst – bereits viele der beschriebenen Funktionsbereiche abdecken können.

In 6.1 werden dazu Möglichkeiten zur Implementierung einer digitalen BIM-basierten Taktplanung anhand von GADGET.P vorgestellt. Im Anschluss daran wird das Gesamtsystem der GADGET.S erläutert, welches aus zwei Teilen besteht. In 6.2 wird die Anwendung GADGET.S1 eingeführt, die zur Zusammenstellung und Verwaltung von digitalen Taktsteuerungstafeln eingesetzt werden kann. Darüber hinaus wird aufbauend auf einer im Rahmen der Arbeiten an der vorliegenden Dissertation erstellen studentischen Abschlussarbeit (vgl. [Grund, 2018]) mit GADGET.S2 gezeigt, wie das Grundgerüst zur Anwendung der GADGET.S sowie deren einzelner Bausteine implementiert werden kann.

Abbildung 6-1 zeigt eine Übersicht der Abhängigkeiten der einzelnen Komponenten. Ihr sind auch die nach Unternehmen und Projekt- bzw. Objektphasen getrennten Datenhaltungen zu entnehmen. Die Implementierung von GADGET-Templates sowie die Anbindung eines CDE, von Unternehmensprozessen und -wissen erfolgen im Rahmen der in dieser Arbeit umgesetzten Programmierung nicht. Diese Bereiche können bei Weiterentwicklungen über normierte Schnittstellen gemäß [DIN SPEC 91391-2:2019-04, 2019] angebunden werden.

6.1 Implementierung der Demonstrationsanwendung GADGET.P

Das in 5.4 beschriebene Konzept wurde unabhängig von der Anwendung spezifischer (Software-)Produkte erstellt. Eine Grundvoraussetzung für dessen Implementierung ist die Möglichkeit, alle beschriebenen Datenquellen, wie digitale Bauwerksmodelle, Firmen- oder Projektwissen, einbinden zu können. Zur Implementierung eines solchen Systems sind verschiedene Ansätze möglich. Neben einer vollständig neuen Entwicklung mit der Definition neuer Datenstrukturen in allen Bereichen können dazu auch bestehende Bibliotheken zum Umgang mit offenen Datenformaten oder kommerzielle Softwaresysteme aus der BIM-Softwarelandschaft

erweitert werden, die über offene APIs den Zugriff auf (Bauwerks-)Daten zulassen. Auch die Anbindung von Datenbanken und weiteren Anwendungen über definierte Schnittstellen ist programmietechnisch möglich. Im Kontext von Bauwerksdaten bestehen trotz offenen Austauschformaten, wie den IFC und normierten Schnittstellen, wie für CDEs mit [DIN SPEC 91391-2:2019-04, 2019] gegeben, jedoch noch große Herausforderungen hinsichtlich des Datenaustausches, da digitale Bauwerksmodelle derzeit in proprietären Softwaresystemen erstellt und verwaltet werden und kein verlustfreier Datenaustausch zwischen unterschiedlichen Softwareanwendungen möglich ist. Diese Systeme sind jedoch besonders zur Umsetzung von Demonstrationsanwendungen wie der GADGET.P geeignet, da die benötigten Funktionen zur Erstellung und Bearbeitung von Bauwerksdaten bereitgestellt werden.

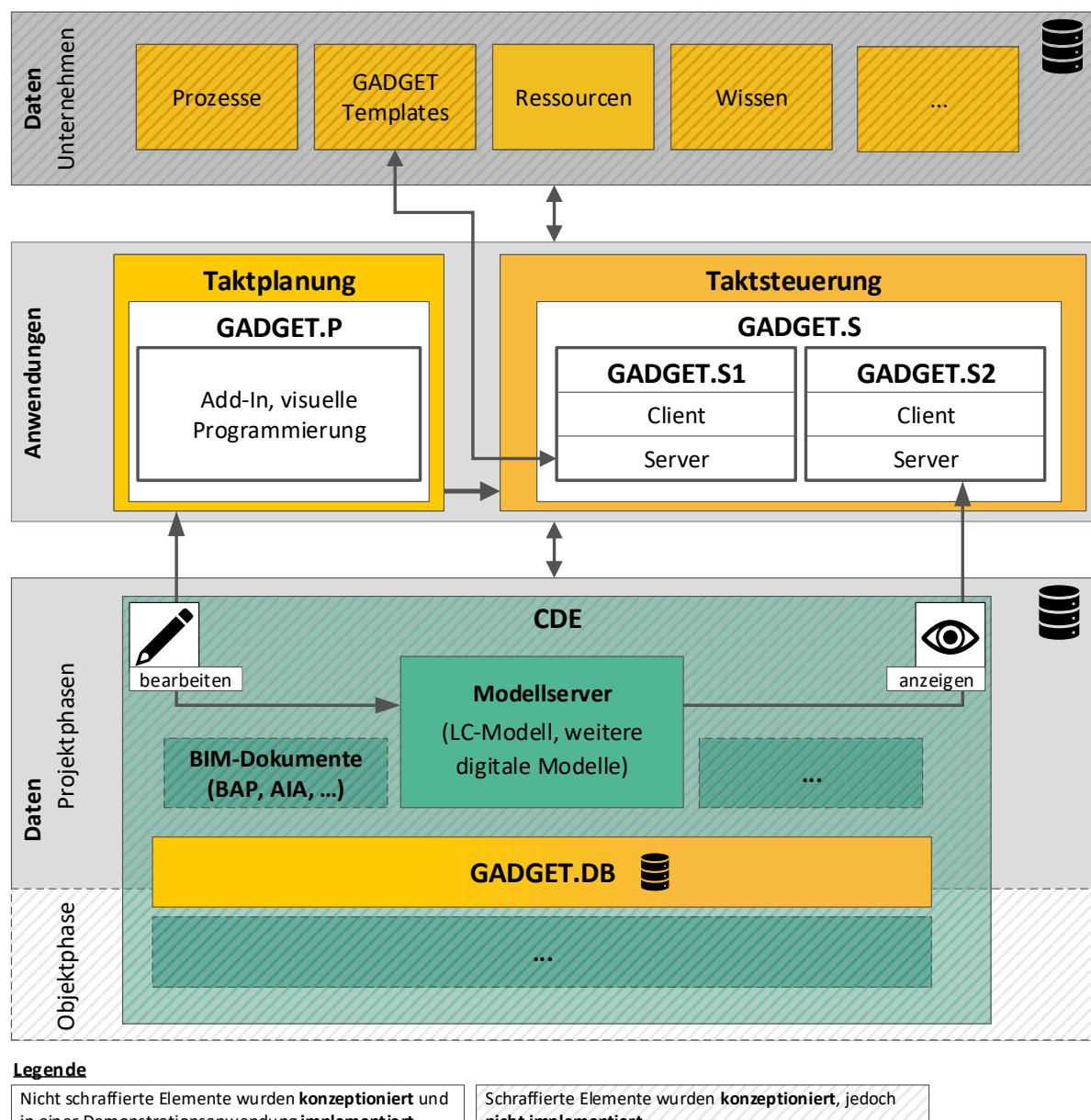


Abbildung 6-1: Übersicht der Softwarestruktur (unterteilt in implementierte/genutzte und konzeptionierte Elemente, Eigene Darstellung)

An dem Beispiel einer visuellen Programmierumgebung wird verdeutlicht, dass durch den Einsatz solcher Strukturen und die verhältnismäßig einfache Möglichkeit zur Erzeugung von Programmlogik ein transparenter Bezug zwischen der Anwendung von Software und den von dieser zu verarbeitenden Arbeitsinhalten geschaffen werden kann. Insbesondere gilt dies für Personen, die keine vertieften Kenntnisse in der Softwareentwicklung besitzen. Des Weiteren kann mit Hilfe visueller Programmierung sehr einfach eine Großzahl verschiedener Planungsvarianten erstellt werden. Dies ist hilfreich, da in der Taktplanung verschiedene Stellschrauben (z. B. einzusetzende Ressourcen oder geometrische Einteilung der Taktabschnitte) zur Ermittlung des bestmöglichen Taktplans existieren.

Anhand der Demonstrationsanwendung wird gezeigt, wie Implementierungen zu den beiden Schritten *Definition der Taktbereiche* und *Harmonisierung der Ausführungszeiten der einzelnen Gewerke durch Anpassung der geplanten Arbeitsressourcen* (vgl. Abbildung 5-8, s. S. 95) umgesetzt werden können.

Verwendete Software

Als Softwareumgebung wurde beispielhaft die Kombination aus Autodesk Revit [Autodesk, h] sowie der gemeinsam damit nutzbaren Open-Source-Software Dynamo [Autodesk, e] gewählt. Revit dient als Grundlage zur Bereitstellung aller bauwerksbezogenen Daten und stellt eine API bereit, die den Zugriff auf Modelldaten sowie deren Erstellung und Veränderung ermöglicht.

6.1.1 Funktionalitäten der gewählten Softwareumgebung

In den folgenden Abschnitten werden Funktionalitäten der gewählten Softwareumgebung zur visuellen Programmierung erläutert, die in den umgesetzten Programmierbeispielen eingesetzt werden.

Interaktionen mit dem Gebäudemodell durch die Verknüpfung von Revit und Dynamo

Wird Dynamo aus Revit heraus gestartet, so können

- Modellelemente ausgewählt
- Parameter von Modellelementen verändert
- Modellelemente auf parametrischer Basis erstellt

werden. Dies ermöglicht es, komplexe Algorithmen zur dynamischen Erstellung von Modellen oder vielfältige Analysen in einer einfach verständlichen grafischen Algorithmeneditorumgebung abzubilden.

Einbinden weiterer Datenquellen

Neben den aus Revit auslesbaren Daten können weitere Datenquellen eingebunden werden. Dies ermöglicht eine Verbindung der Bauwerksdaten mit denen aus anderen Informationsbereichen, wie etwa Ressourcen oder Prozesse. In Dynamo integriert sind Pakete zum Lesen und Schreiben von Microsoft Excel und comma-separated values (CSV) Dateien sowie die Möglichkeit, Lese- und Schreibzugriffe auf das Dateisystem durchzuführen. Weiterhin integriert ist die Möglichkeit, Anfragen an Webservices ausführen zu lassen und deren Ergebnis weiter zu nutzen [Gidei, 2019]. Es existiert darüber hinaus eine Vielzahl an Erweiterungen, die den Zugriff auf verschiedene Datenbanksysteme ermöglichen [Nathan Miller, 2019].

Auslesen von Bauteildaten

Mit dem Zugriff auf die Bauwerksdaten über die Revit API können alle Bauwerkselemente identifiziert und deren Eigenschaften in Dynamo ausgelesen werden. Das Wissen über z. B. die hinterlegten Bauteilgeometrien ermöglicht es beispielsweise, die in zuvor festgelegten Bereichen (z. B. Taktabschnitte oder -bereiche) vorhandenen aggregierten Mengen zu ermitteln. Dies kann klassifiziert nach den für die einzelnen Gewerke notwendigen Größen geschehen; für den Rohbau eines Gebäudes können Volumina der Stahlbetonteile ausgelesen werden. Für Gewerke des Innenausbau hingegen können Boden-, Decken- oder Wandoberflächen abgefragt werden.

Programmcode in DesignScript oder Python

Mit Hilfe der eigens als Grundlage für Dynamo entwickelten Programmiersprache DesignScript [Autodesk, b] lassen sich auf einfache Weise Definitionen und Funktionen in Codeblöcken zusammenfassen. Auch ist es möglich, mittels Quellcode in der Programmiersprache Python komplexe Algorithmen abzubilden, Berechnungen durchzuführen zu lassen und externe Bibliotheken einzubinden.

6.1.2 Demonstration des Einsatzes visueller Programmierung im Kontext der Taktplanung

Anhand eines Beispiels¹ wird im Folgenden gezeigt, wie die gewählte Softwareumgebung aus Autodesk Revit und Dynamo genutzt werden kann, um Zusammenhänge und Berechnungen visuell verständlich darzustellen und wie nach dem „Black-Box-Prinzip“ komplexer Quellcode vereinfacht dargestellt werden kann.

¹ Teile des Quellcodes dieses Beispiels wurden vom Autor gemeinsam mit Frau Laura Möller im Rahmen des *International AEC/FM Hackathon* der Konferenz *35th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)* (Berlin, 20. - 25.07.2018) erstellt.

Gesamtablauf

Zur Demonstration wurde eine Anwendung erstellt, die den in Abbildung 6-2 dargestellten Ablauf mittels visuellen Programmcodes ausführt. Sie ermöglicht es, aus einem Gebäudegrundriss Taktbereiche zu ermitteln. Diesen werden die darin liegenden Räume und die in diesen enthaltenen Wandobjekte resp. deren zum Rauminneren zeigenden Wandoberflächen zugeordnet. Auf Basis mehrerer zur Laufzeit benutzerseitig anpassbarer Eingabeparameter sowie Aufwandswerten werden die optimalen Kolonnenstärken zur Erreichung des vorgegebenen Taktes für mehrere Gewerke bestimmt. Aus Abbildung 6-2 wird deutlich, dass der Prozess erneut ausgeführt wird, sobald sich Eingabeparameter verändern.

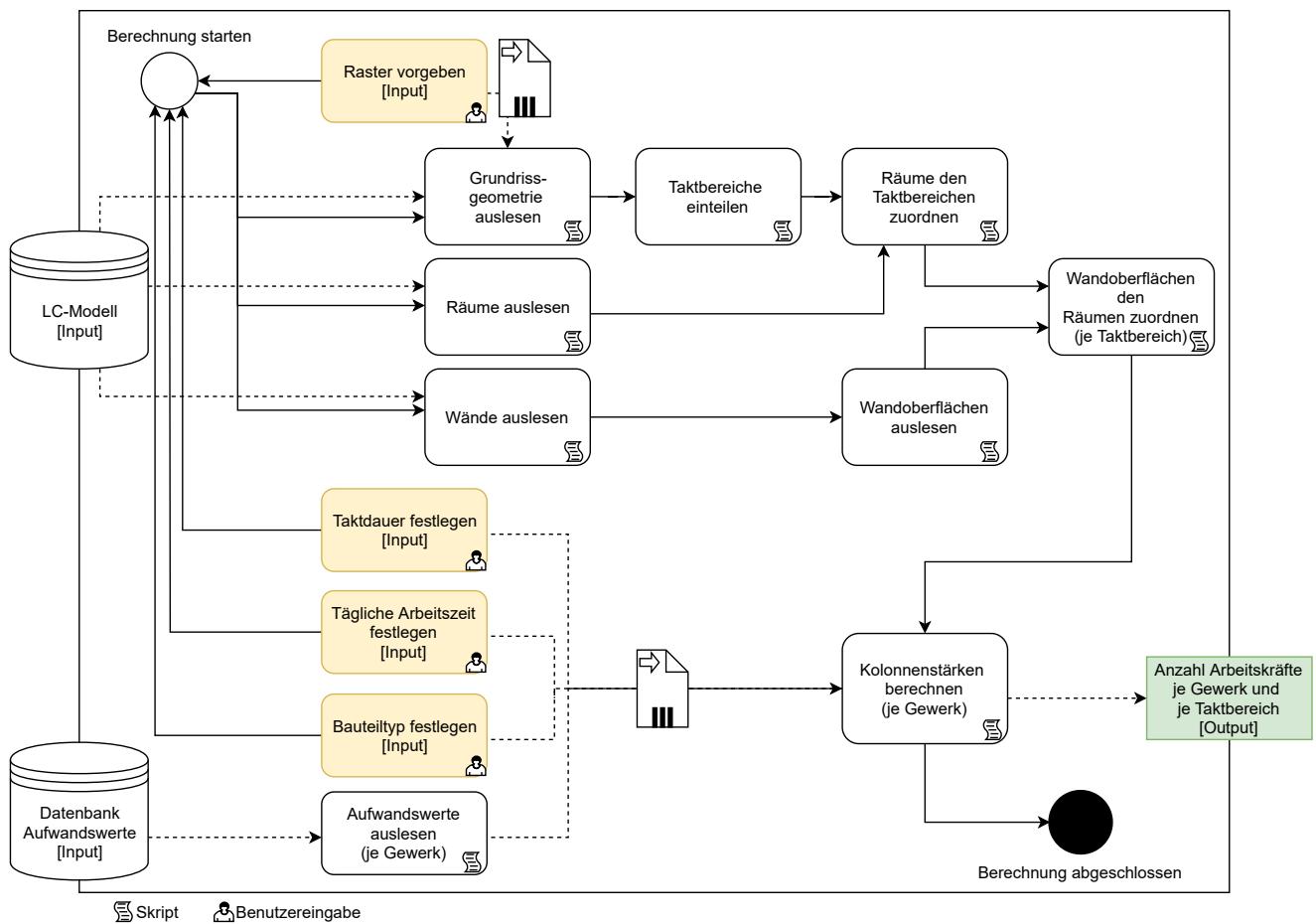


Abbildung 6-2: Auf UML aufbauendes, erweitertes Ablaufdiagramm der Demonstrationsanwendung GADGET.P (Eigene Darstellung in Anlehnung an [ISO/IEC 19505-1:2012(E), 2012])

Eingangswerte

Neben dem Gebäudemodell werden zur Berechnung der notwendigen Kolonnenstärken der einzelnen Gewerke weitere Eingangs- resp. Eingabeparameter benötigt. Dazu zählen die Auflösung des Rasters in x- und y-Richtung (Anzahl der zu erzeugenden Bereiche) sowie die Taktdauer

in Tagen. Diese Parameter können vom Anwender per Schieberegler intuitiv angepasst werden, sodass darauf basierend augenblicklich die Ermittlung der entsprechenden Kolonnenstärken erfolgt.

Automatische Einteilung des Grundrisses in Taktbereiche

Durch die Vorgabe von geometrischen Funktionen ist es möglich, den Bauwerksgrundriss automatisiert in einzelne Bereiche einteilen zu lassen. Beispielhaft wird dazu in der Demonstrationsimplementierung ein vom Anwender in Dynamo in x- und y-Richtung über die Grundrissalebene anpassbares Raster zur Erzeugung von Taktbereichen erstellt.

In Abbildung 6-3 ist der Quellcode zur Berechnung des Rasters der Taktbereiche dargestellt. Als Eingangsgrößen zur Ermittlung werden alle Stahlbetonbauteile ausgelesen sowie vom Anwender die Anzahl der Taktbereiche in x- und y-Richtung per Schieberegler festgelegt. Das Ergebnis sind Volumenkörper (durch umschließende, sog. „Bounding Boxes“ abgebildete Quader), die zur Ermittlung der darin enthaltenen Räume im nächsten Schritt dienen.

Zuordnung von Räumen zu Taktbereichen

Im Anschluss an die geometrische Erzeugung der Taktbereiche werden die aus dem Bauwerksmodell ausgelesenen Raumelemente den einzelnen Zellen des Rasters, also den Taktbereichen, zugewiesen. In Abbildung 6-4 sind neben dem Dynamo Code auch zwei in der Programmiersprache Python erstelle Skripte zu sehen. Diese stellen Beispiele für Quellcode dar, der von Endanwendern nicht verändert werden muss und so als Black-Box angesehen werden kann. Die farbig markierten Parameter (*IN[0]*, *IN[1]*, *IN[2]* und *OUT*) zeigen die Zuordnung von den Python Blöcken in Dynamo zu dem in Python geschriebenen Quellcode.

Berechnung der benötigten Kolonnenstärken der Gewerke

Zur Berechnung der benötigten Kolonnenstärken werden die nachfolgen, in Abbildung 6-5 dargestellten Schritte durchgeführt:

1. Benötigte Arbeitsstunden [Ah] je Takt und Gewerk durch Multiplikation der Summen aller Wandoberflächen [m^2] je Taktbereich (x) mit den Aufwandswerten [Ah/m^2] je Gewerk (y) berechnen
2. Benötigte Arbeitsstunden (x) durch Multiplikation mit Arbeitsstunden je Tag [Ah/d] (y) in Tage [d] umrechnen
3. Anzahl benötigter Arbeitskräfte je Gewerk durch Division der Tage je Takt und Gewerk (x) und der gewünschten Taktdauer in Tagen [d] (y) berechnen
4. Anzahl der Arbeitskräfte auf nächste ganze Zahl aufrunden

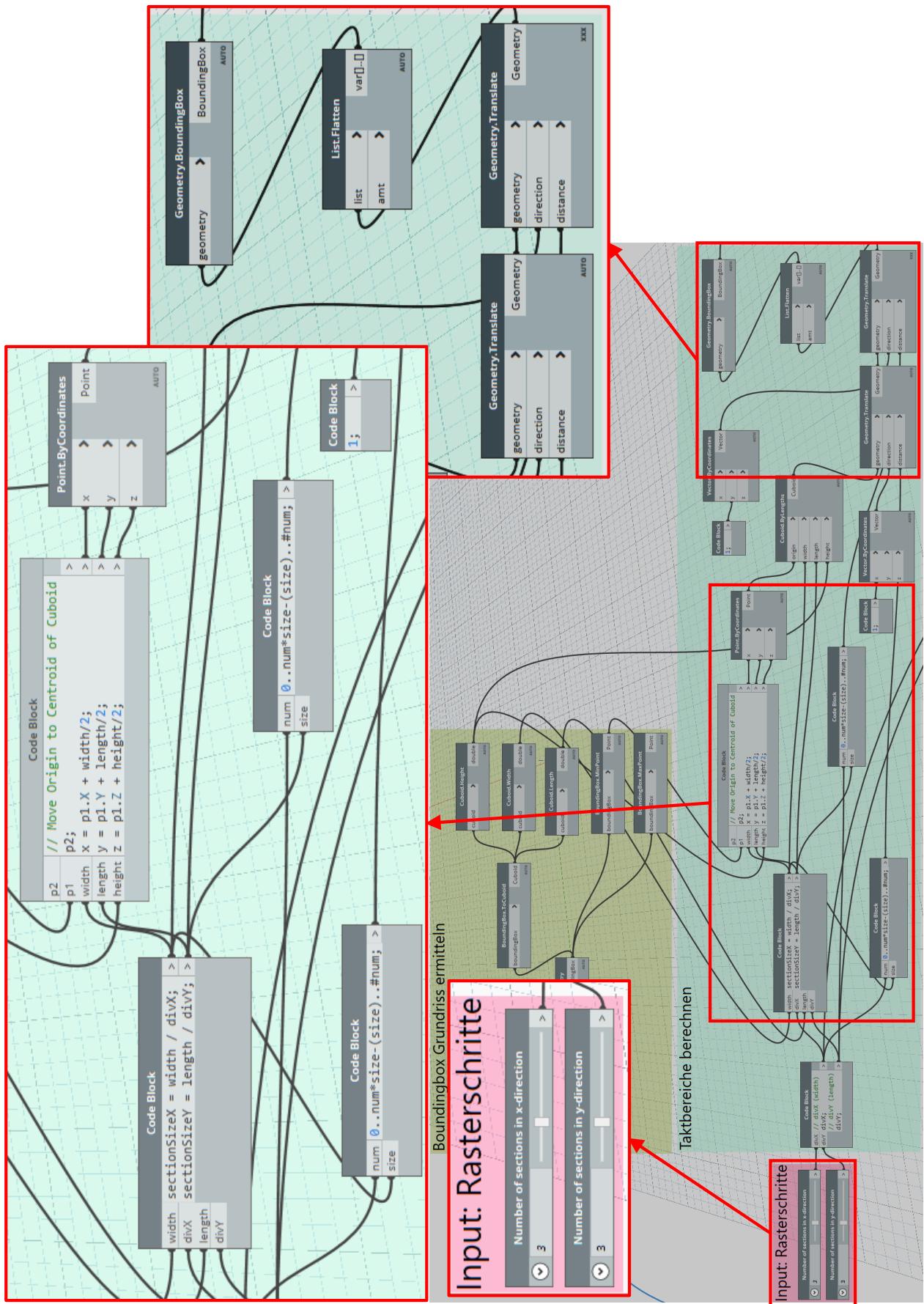


Abbildung 6-3: Dynamo Quellcode zur Einteilung des Grundrisses in ein Raster (Eigene Darstellung)

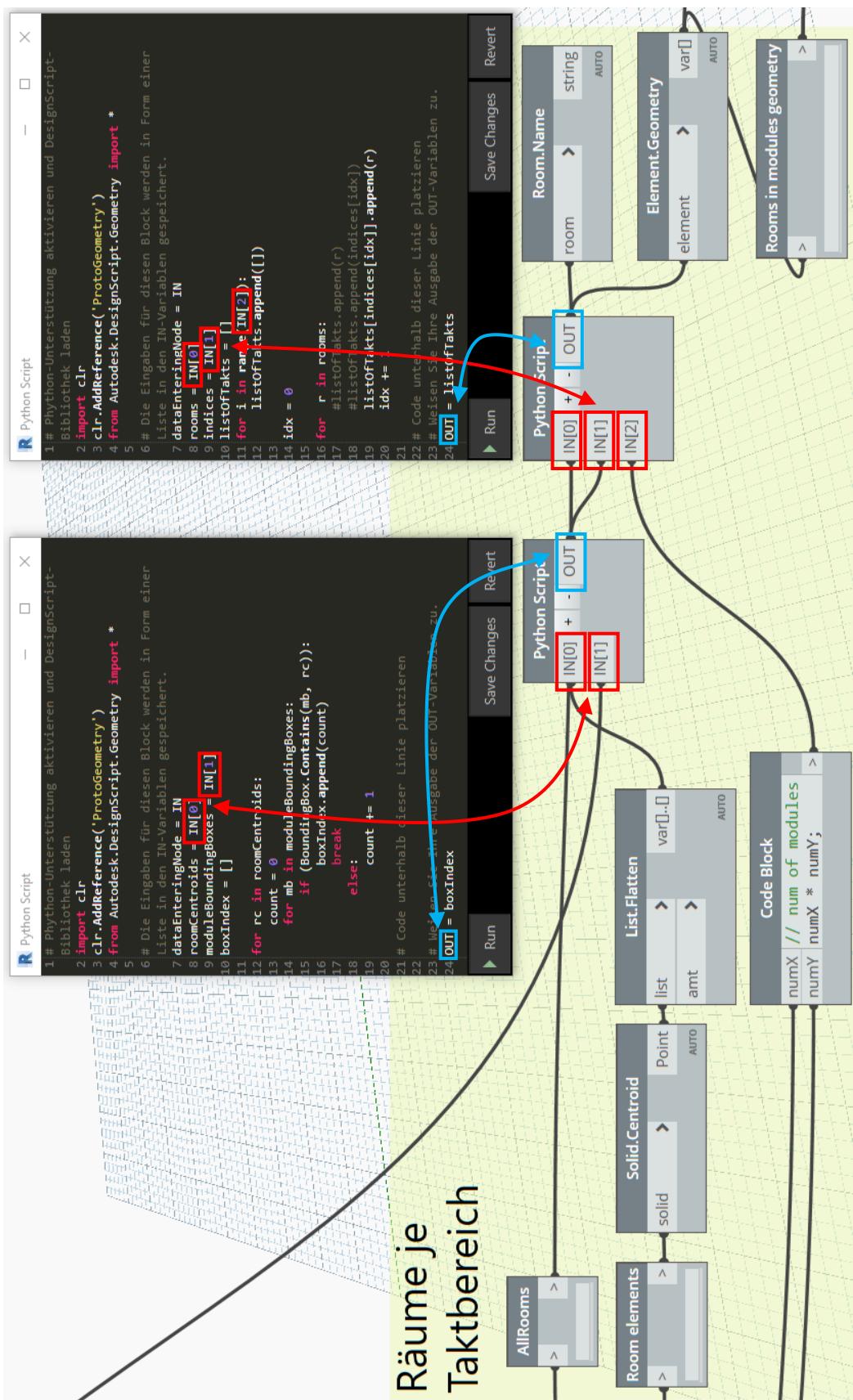


Abbildung 6-4: Dynamo Quellcode zur Zuordnung von Räumen zu Taktbereichen; rot und blau markiert: Verknüpfung der Eingabe- und Ausgabeparameter zweier Python Skripte mit den Eingängen bzw. Ausgängen der Dynamo Blöcke (Eigene Darstellung)

Da als Eingabewerte eine Liste aller Gewerke sowie eine Liste aller auf Taktbereiche bezogenen Wandoberflächen dienen, wird als Ergebnis eine korrespondierende Liste der benötigten Arbeitskräfte je Gewerk zur Erreichung der ermittelten Taktbereiche in der vorgegebenen Taktzeit ausgegeben.

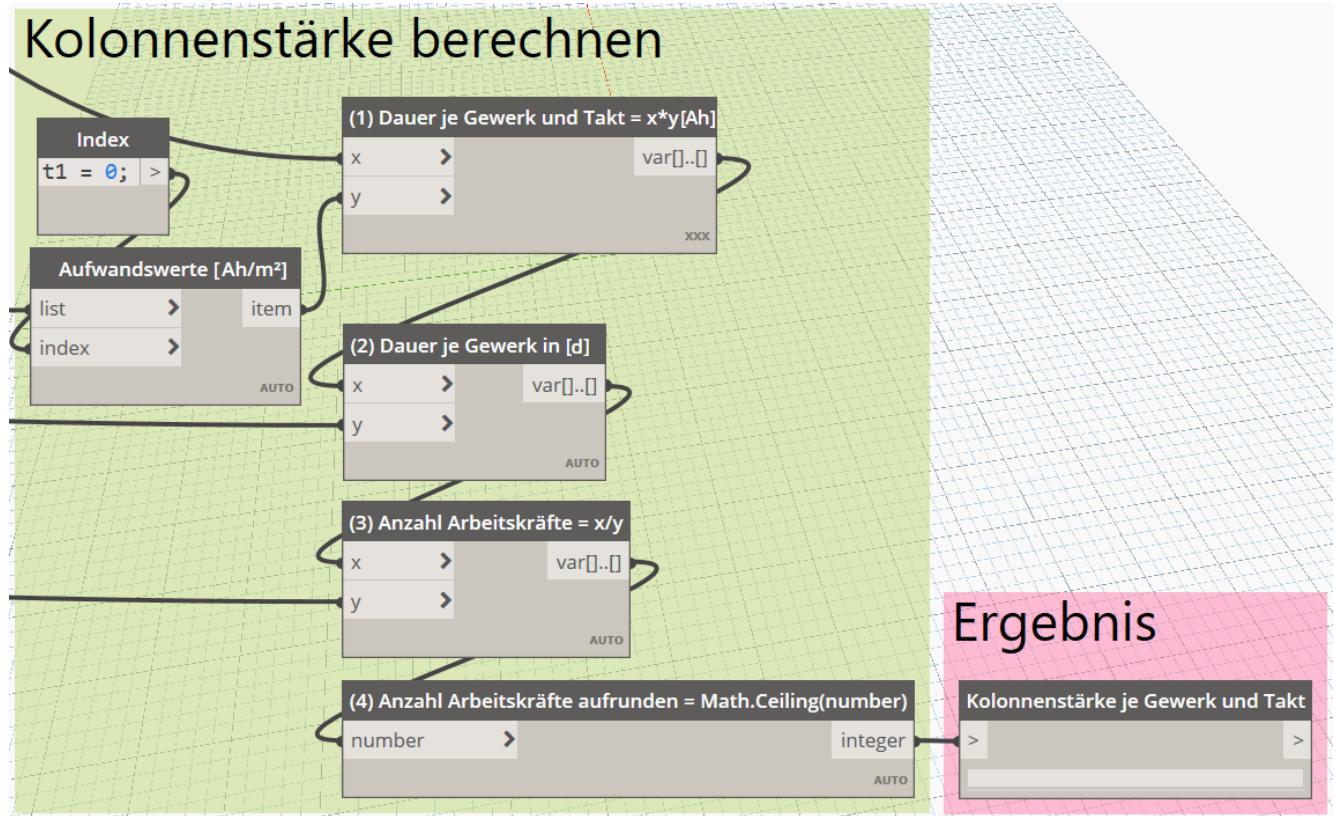


Abbildung 6-5: Dynamo Quellcode zur Berechnung der benötigten Kolonnenstärke (Eigene Darstellung)

6.2 Implementierung der Demonstrationsanwendung GADGET.S

Um die fünf in 5.6 beschriebenen Schritte der Anwendung von GADGET.S abzudecken, ist deren Implementierung in zwei Teilanwendungen gegliedert. GADGET.S1 dient auf Basis der ermittelten Anwendungsfälle der in 5.6.1 beschriebenen Zusammenstellung von Layouts und Templates (vgl. I, II & III in Abbildung 6-6). Die zweite Teilanwendung, GADGET.S2, kommt bei der Einrichtung (5.6.2) und konkreten Nutzung (5.6.3) des Systems während der Ausführungsphase zum Einsatz (vgl. IV & V in Abbildung 6-6). Die Trennung dieser beiden Bereiche ist softwaretechnisch nicht notwendig. Da die Einrichtung jedoch nur zu Beginn und ggf. bei Anpassungen im Projekt erfolgt, kann GADGET.S1 als separate Anwendung bei Bedarf aufgerufen werden und unabhängig von GADGET.S2 weiterentwickelt und gewartet werden. Darüber hinaus unterscheiden sich die Anwender und Inhalte deutlich voneinander. Während GADGET.S1 der Administration durch wenige berechtigte Personen dient, sollen auf GADGET.S2 eine Vielzahl an Anwendern Zugriff auf konkrete Projektinhalte haben.

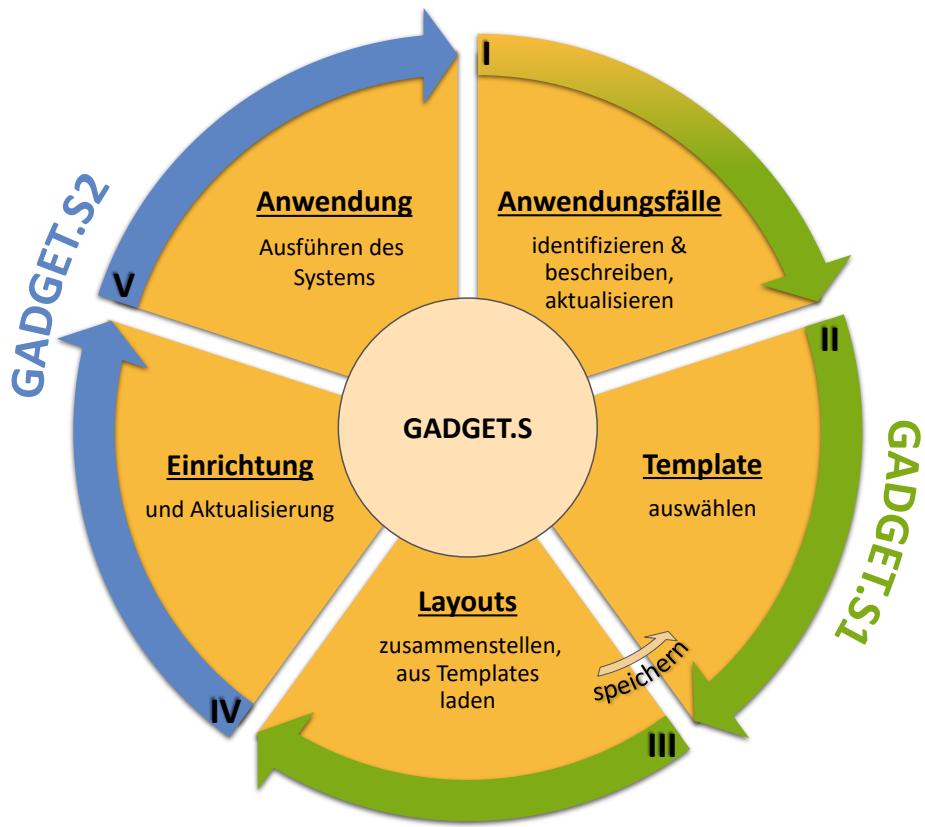


Abbildung 6-6: Teilanwendungen GADGET.S1 und GADGET.S2 (Eigene Darstellung)

6.2.1 Programmierung und Technologien

Im Gegensatz zur Taktplanung müssen bei beiden Anwendungen der GADGET.S Bauwerksdaten vor allem gelesen und nicht bearbeitet oder neu erstellt werden. Somit ist für diese Daten softwareseitig ein Modelviewer, der eine Visualisierung und Verknüpfung mit anderen Informationsbereichen erlaubt, ausreichend und ein Grundbestandteil der Implementierung. Die über den Projektverlauf dynamischen und taktsteuerungsrelevanten Informationen werden aus anderen Datenquellen, wie direkt angebundenen Datenbanken oder Webservices, ausgelesen und dort abgespeichert. Daher können die beiden Teilanwendungen auf Webtechnologien aufbauend implementiert und so die in 3.3.4 beschriebenen Anforderungen an das System erfüllt werden.

Für beide Anwendungen wurde ein Aufbau gemäß eines sog. *MEAN-Stacks* gewählt. Dabei handelt es sich um eine Zusammenstellung einander unterstützender Webtechnologien, die auf der Programmiersprache JavaScript resp. darauf aufsetzend auf TypeScript basieren. Die einzelnen Komponenten sind gemäß einer Client-Server-Architektur aufgeteilt:

- MongoDB: Dokumentenbasierte NoSQL Datenbanken zur Datenhaltung

- Express: JavaScript-basiertes Back-End-Webframework zur Vereinfachung der serverseitigen Entwicklung aufbauend auf Node.js
- Angular: TypeScript-basiertes Front-End-Webframework zur Entwicklung der clientseitigen Anwendung
- Node.js: JavaScript-basierte Back-End-Laufzeitumgebung zur Entwicklung von Serveranwendungen

Wie im Folgenden gezeigt wird, können durch die Nutzung der weitverbreiteten Programmiersprache JavaScript und einer Umgebung wie Node.js nicht nur sehr flexibel eigene Anwendungen entwickelt, sondern auch viele vorhandene Bibliotheken zur Implementierung des vorgeschlagenen Konzeptes eingebunden werden.

6.2.2 Implementierung und Verifizierung der technischen Umsetzbarkeit von GADGET.S1

Die Kernaufgabe der Anwendung GADGET.S1 ist es, vorbereitend zur Anwendung von GADGET.S2 in Projekten für beliebige Anwendungsfälle Layouts zusammenstellen, verwalten und als Templates für künftige Projekte hinterlegen zu können. Die in 5.5.11 beschriebenen Bausteine werden darin noch nicht mit konkreten Datenquellen verknüpft. Die Anwendung gliedert sich in die zwei wesentlichen Funktionsbereiche:

- Darstellung einer Liste gespeicherter Layouts
- Geführte Zusammenstellung neuer Layouts

Programmstruktur

Die Anwendung umfasst gemäß der Client-Server-Architektur eine jeweils eigenständige Client-(Front-End) sowie Server- (Back-End) Anwendung. Durch die strukturelle Trennung von Interaktions- und Darstellungsebene im Front-End und der Verarbeitungsebene im Back-End wird sichergestellt, dass nur solche Anfragen bearbeitet werden, die serverseitig implementiert sind. Dies gilt insb. für Anfragen an Datenbanken oder externe Services, die nur von dem Back-End aus durchgeführt werden können. Die Datenverarbeitung und -haltung sind damit von der Benutzerebene gekapselt, sodass nur berechtigte Zugriffe auf festgelegte Datenbestände durchgeführt werden können.

Client: Die Front-End-Komponente bildet die Schnittstelle zur Interaktion mit den Anwendern. Sie wird in Form einer Weboberfläche dargestellt. Die aus JavaScript-Quellcode erzeugte HTML-Seite kann in aktuellen Browser-Anwendungen auf beliebigen Endgeräten dargestellt werden. Durch die Umsetzung in Form einer sog. Single-Page-Webanwendung (engl. *single-page application*, kurz *SPA*) können Inhalte dynamisch nachgeladen werden, ohne die gesamte Seite neu laden zu müssen [Google Code, 2019].

Mittels des Angular Frameworks ist es möglich, das Front-End modular in einzelnen Komponenten (*Components*) zu strukturieren. Diese bestehen jeweils aus vier funktional getrennten Dateien:

- **.html** (Hypertext Markup Language): Beschreibung der Struktur (Aufbau / Gliederung) der Webseite
- **.css** (Cascading Style Sheet): Beschreibung der Darstellung (Layout, Farben etc.)
- **.ts** (TypeScript): Beschreibung der Funktionalität der Komponente
- **.spec.ts** (TypeScript): Datei zur Durchführung von Unit-Tests

Komponenten können miteinander interagieren und verschachtelt werden. Dies ist dann hilfreich, wenn Teile der Webseite mehrfach verwendet werden sollen, bei denen sich nur einzelne Inhalte ändern. Bei GADGET.S1 kommt dieser Ansatz an mehreren Stellen zum Tragen:

- **Grundgerüst** der Anwendung: Definition der grundlegenden Struktur der Webseite, in der verschiedene Komponenten angezeigt werden (Navigation, Inhaltsbereich).
- **Layouts**: In einem definierten Bereich zur grafischen Zusammenstellung können Baustein-Komponenten platziert werden.
- **Bausteine**: Die Struktur der Bausteine ist einmal definiert, sodass auf diesem Aufbau basierend beliebig viele Bausteine in der Anwendung dargestellt werden können.

In Abbildung 6-7 sind die wichtigsten Elemente der Programmstruktur des Front-Ends von GADGET.S1 dargestellt. Die Datenmodelle und danach strukturierten Ressourcen sind entsprechend der in 5.3.1 beschriebenen Objekte umgesetzt.

Im Rahmen der Entwicklung der Demonstrationsanwendungen kamen bei der Anwendung GADGET.S1 die nachfolgenden Frameworks und Bibliotheken zum Einsatz:

- Verschieben und Anpassen der Größe von Bausteinen: angular2-draggable [Xie, 2019]
- Erstellen von interaktiven Auswahlfeldern (Sprachen, Rollen, Datenquellen): RxJS [Lesh, 2019]
- Grafische Gestaltung der Oberfläche in Anlehnung an das *Material Design*: Angular Material [Google LLC, 2019]

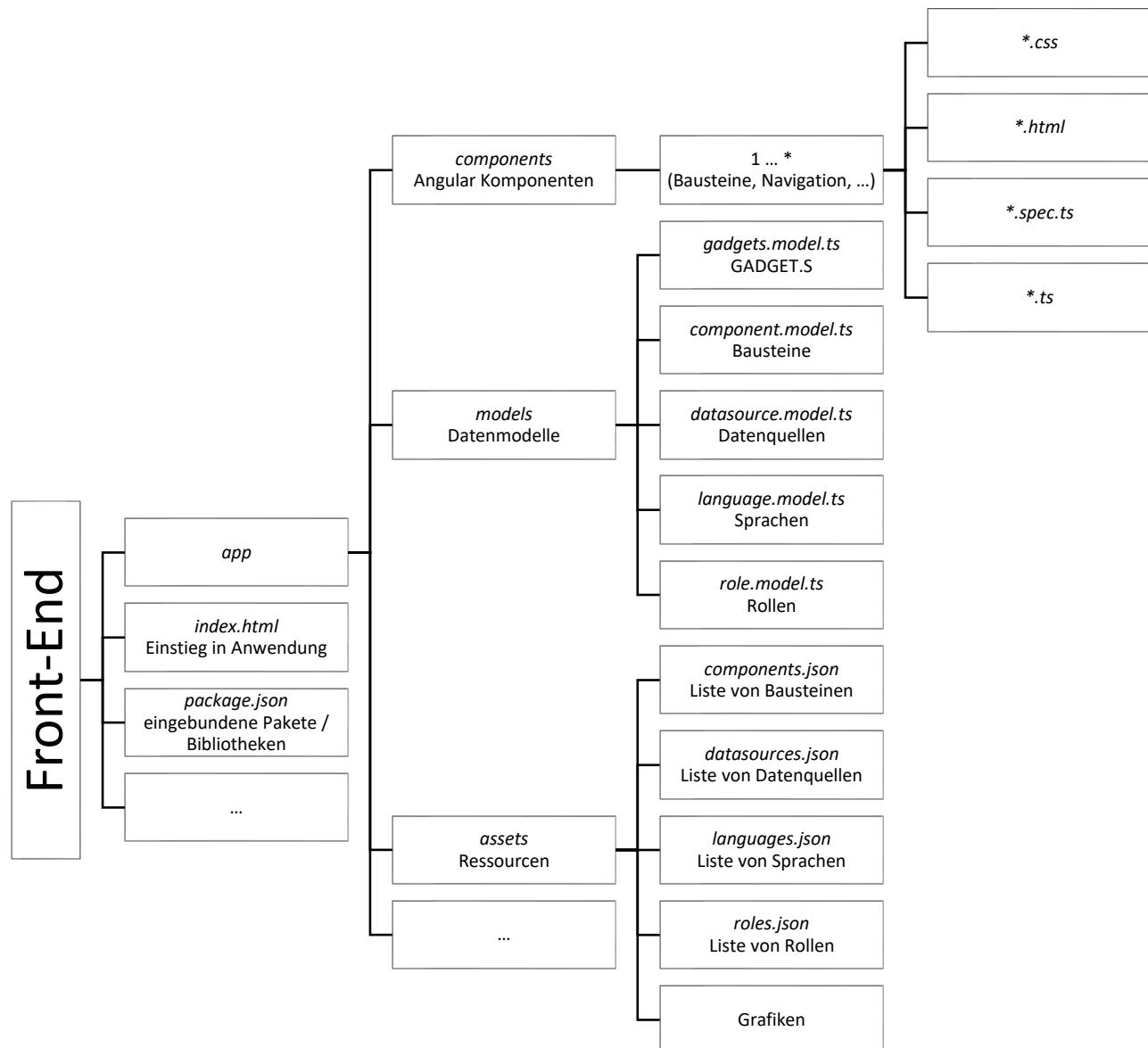


Abbildung 6-7: Programmstruktur des Front-Ends von GADGET.S1 (Eigene Darstellung)

Server: Die Back-End-seitige Server-Komponente stellt über definierte Schnittstellen Funktionen zur Datenverarbeitung und -übermittlung zur Verfügung, die mittels Webservice von dem Front-End – oder auch weiteren, berechtigten Anwendungen – aufgerufen werden können. Sie wird durch eine auf Basis von Node.js implementierte Anwendung ausgeführt und stellt eine Verbindung zu der GADGET.DB her. Zum Anbinden dieser MongoDB-Datenbank wird die Bibliothek mongoose eingesetzt, die ein einfaches, objektbasiertes Arbeiten auf Basis der im Back-End definierten Datenmodelle [LearnBoost, 2019] erlaubt.

Abbildung 6-8 zeigt die wichtigsten Elemente der Programmstruktur des Back-Ends von GADGET.S1.

Back-End

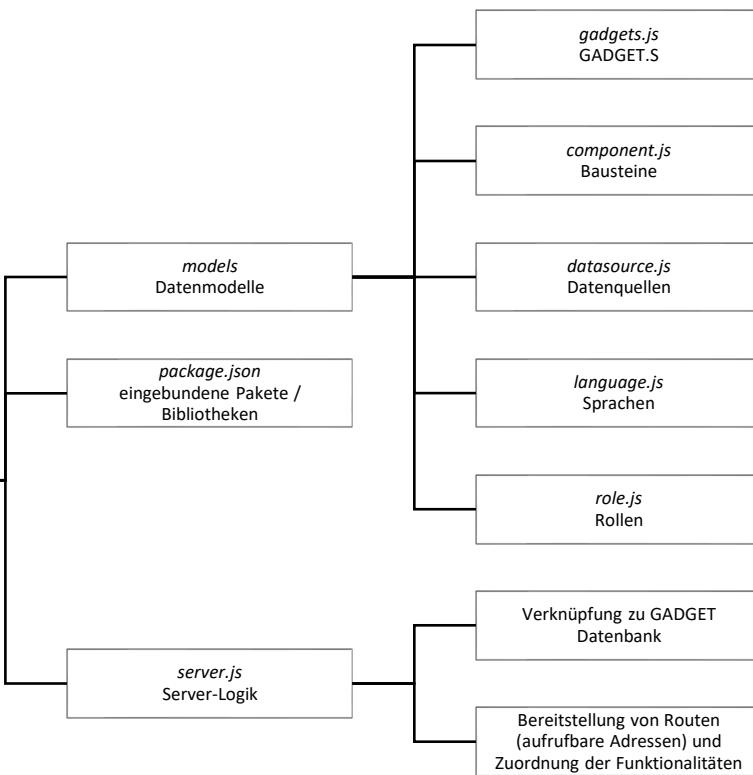


Abbildung 6-8: Programmstruktur des Back-Ends von GADGET.S1 (Eigene Darstellung)

Datenbank: Zur Datenhaltung kommt die dokumentenbasierte NoSQL Datenbank MongoDB [MongoDB, 2019] zum Einsatz. Darin werden Informationen gemäß der im Back-End definierten Datenmodelle in auf dem JSON-Datenformat aufbauenden Dokumenten gespeichert. Für GADGET.S1 wurden dazu u. a. die in Abbildung 5-10 (s. S. 100) und Abbildung 5-12 (s. S. 103) beschriebenen Datenstrukturen im Back-End abgebildet.

Benutzeroberfläche und Zusammenstellung von Layouts

Das Zusammenstellen von Layouts wurde gemäß des in Abbildung 5-27 (s. S. 132) geschilderten Ablaufes umgesetzt. Dabei wurden zu Demonstrationszwecken die Schritte A.1 bis A.4 (Eingabe von allgemeinen Informationen, Details zu Endgeräten, beteiligten Rollen und Datenquellen), B.1 bis B.4 (Bausteine einrichten) und C.1 (Layout speichern) implementiert.

Abbildung 6-9 zeigt den Aufbau der GADGET.S1. Eine Menüleiste am oberen Rand kann genutzt werden, um zwischen einer Übersicht erstellter Layouts und einer Seite zum Erstellen ebendieser zu wechseln. Letztgenannte gliedert sich in zwei Bereiche. Im oberen Teil befindet sich ein Block (helle Hintergrundfarbe), in dem der Benutzer zwischen den vier Schritten zur Erstellung des Layouts wechseln und Eingaben tätigen kann (Schritte A.1 bis A.4 und C.1). Darunter befindet sich eine Fläche (dunkle Hintergrundfarbe), auf der die ermittelten Bausteine platziert werden können (Schritte B.1 bis B.4).

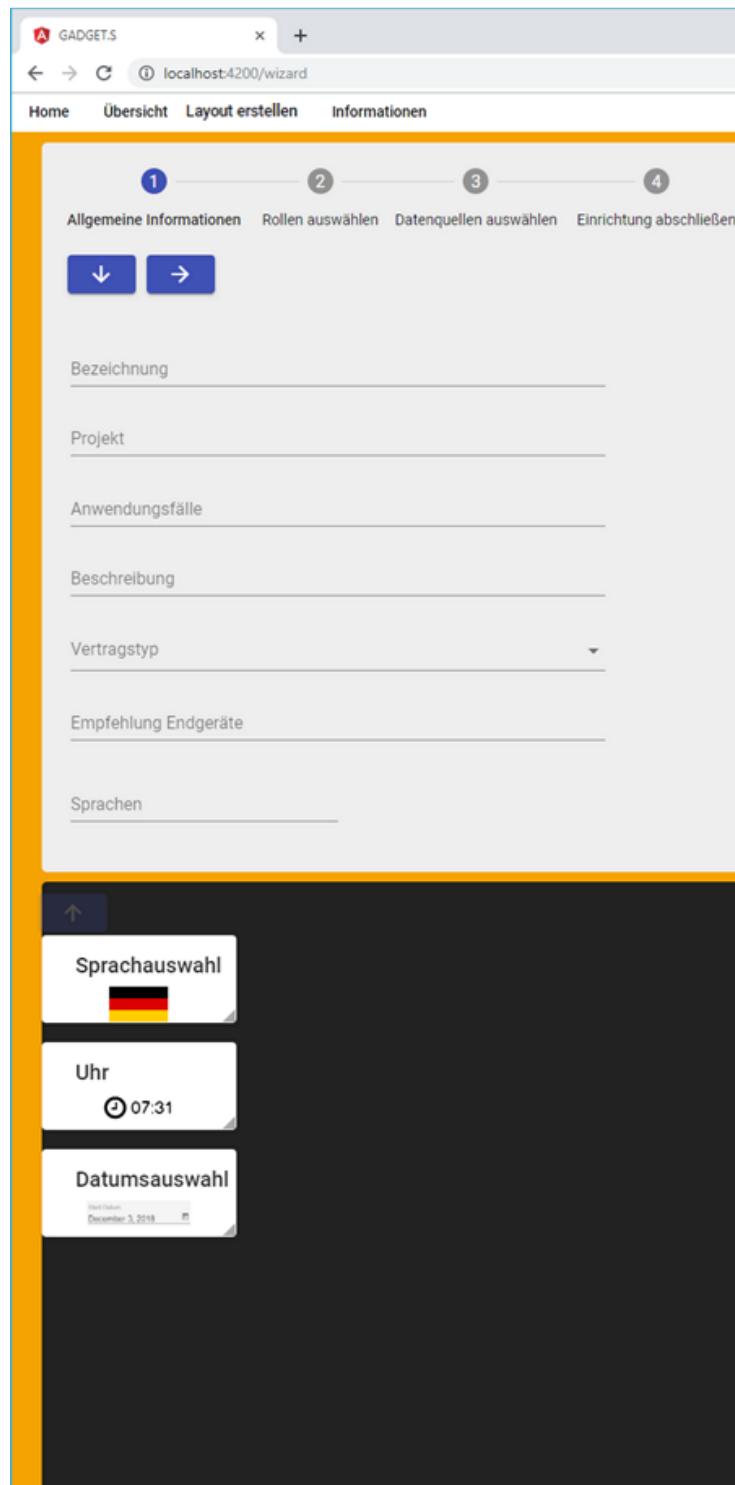


Abbildung 6-9: Grafische Benutzeroberfläche zum Erstellen von Layouts (Eigene Darstellung)

Die verfügbaren Sprachen, Rollen und Datenquellen werden beispielhaft aus den korrespondierenden JSON-Dateien aus dem Ordner *assets* ausgelesen (vgl. Abbildung 6-7). Alternativ dazu könnten Informationen zu verfügbaren Sprachen mittels Webservice aus ansprechbaren Wörterbüchern, wie den bSDD abgerufen werden. Im Gegensatz zu gewöhnlichen Auswahl- oder Textfeldern können die Einträge intelligent durchsucht und mehrere ausgewählt werden.

(vgl. Abbildung 6-10). Dies wird u. a. durch die Einbindung der Bibliothek RxJS ermöglicht. Auch werden bei diesen Elementen mittels eines MouseOver-Effekts tiefergehende Informationen (vgl. dunkelgraue Infoboxen in Abbildung 6-10) zu diesen Elementen dargestellt.

Darüber hinaus findet, wie in 5.6.1 beschrieben, bei der Auswahl von Rollen und Datenquellen eine automatische Filterung der anzuzeigenden Bausteine statt, sodass nur solche Bausteine dargestellt werden, zu denen passende Rollen und Datenquellen ausgewählt wurden.

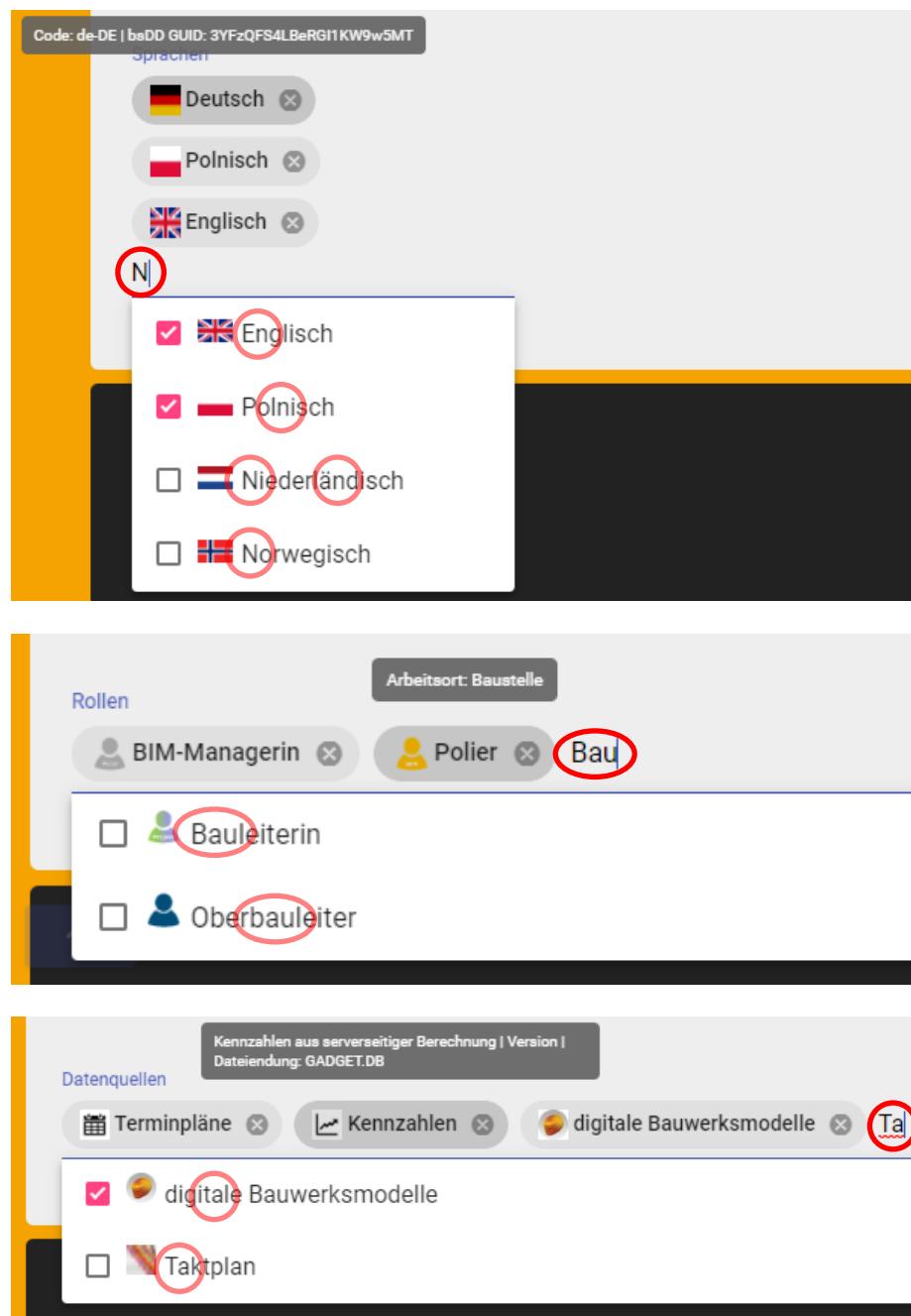


Abbildung 6-10: Durchsuchbare Eingabefelder für Sprachen, Rollen und Datenquellen (Eigene Darstellung)

Platzierung und Anpassung von Bausteinen

Die Erstellung von Layouts kann in Abhängigkeit der Auflösung der Bildschirme der einzusetzenden Endgeräte erfolgen. Die in Abbildung 6-11 dargestellte dunkelgraue Fläche spiegelt diese Bildschirmfläche mit der eingestellten Auflösung wider. In der Demonstrationsanwendung wird standardmäßig eine Auflösung von 1920 Pixel * 1080 Pixel (Full HD) dargestellt². Wird das erstellte Layout in der Anwendung GADGET.S2 auf einem Gerät mit Full HD - Bildschirm dargestellt, so füllt es den gesamten Bildschirm.

Die Platzierung von Bausteinen erfolgt nach den in Abbildung 5-27 (s. S. 132) beschriebenen Schritten *B.1* bis *B.4* und wurde entsprechend programmierseitig umgesetzt.

Die Auswahl der Bausteine nach Schritt *B.1* ist derart implementiert, dass nur solche Bausteine für das Layout hinterlegt werden, die vom Benutzer aktiviert wurden.

Gemäß des Schrittes *B.2* können die ausgewählten Bausteine mit Hilfe von Funktionen der Bibliothek angular2-draggable frei verschoben und in ihrer Größe so angepasst werden, wie sie bei dem Betrieb der GADGET.S dargestellt werden sollen. Dabei werden drei Restriktionen eingehalten:

- Bausteine können nur innerhalb der simulierten Displayfläche verschoben werden. Es wird automatisch verhindert, dass sie über deren Ränder hinausgeschoben werden können.
- Für jeden Baustein können individuelle Minimal- und Maximalwerte für Breite und Höhe hinterlegt werden. So kann sichergestellt werden, dass Bausteine entsprechend ihres Inhaltes nicht zu groß oder zu klein eingebunden werden können.
- Sowohl das Verschieben, als auch das Ändern der Größe basiert auf einem nicht sichtbaren Raster, sodass die vertikale und horizontale Anordnung stets übersichtlich und einheitlich ist.

Für Bausteine können Berechtigungen für Lese- und Schreibzugriffe zu den in Schritt *A.3* ausgewählten Rollen festgelegt werden (Schritt *B.3*). Im späteren Betrieb können so nur dann entsprechende Inhalte der Bausteine angezeigt resp. verändert werden, wenn der angemeldete Benutzer dazu berechtigt ist. Die Fenster zur Anzeige der Einstellungen lassen sich über einen Schalter in der oberen rechten Ecke der Bausteine ein- und ausblenden. Dadurch kann die Übersichtlichkeit bei der Zusammenstellung des Layouts gewahrt werden. Auch können diese Einstellungen für allgemeine Bausteine (bspw. Uhr, Datum, Sprachauswahl) komplett deaktiviert werden.

Der in dem Konzept beschriebene Ansatz zur Darstellung verschiedener Detaillierungsgrade ist nicht vollständig implementiert. Es ist jedoch exemplarisch möglich, zwischen drei Detaillierungsstufen der Ansicht zu wählen (Schritt *B.4*).

² Die gezeigten Screenshots der Anwendung wurden auf einem Bildschirm mit 2560 Pixel * 1440 Pixel (WQHD) erstellt.

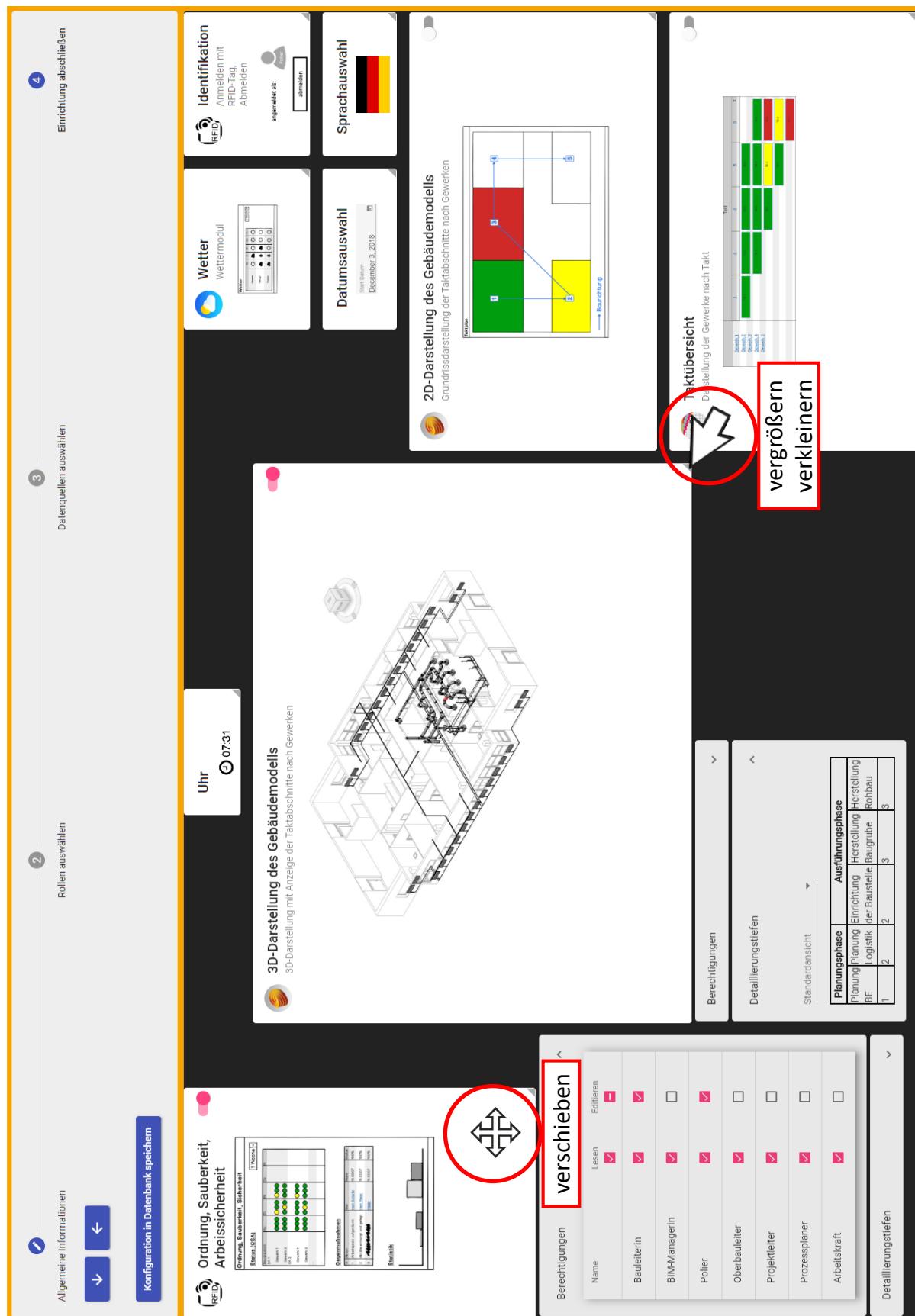


Abbildung 6-11: Grafische Benutzeroberfläche zur Platzierung und Anpassung von Bausteinen (Eigene Darstellung)

Übersicht gespeicherter Layouts

Über Aufrufen des Menüpunktes *Übersicht* wird eine Liste aller gespeicherten Layouts geladen. In dieser können Details zu deren Inhalten und Anordnungen aufgerufen und analog zur Erstellung im unteren Bereich der Seite der Aufbau der Bausteine geladen werden. Weiterhin können hier Layouts gelöscht werden.

6.2.3 Implementierung und Verifizierung der technischen Umsetzbarkeit von GADGET.S2

Auch die Programmierung von GADGET.S2 basiert auf einem MEAN-Stack. Im Gegensatz zu der Anwendung GADGET.S1 werden in diesem Teil jedoch die in Layouts zusammengestellten Bausteine mit konkreten Inhalten geladen. Durch den modularen Aufbau der Anwendung in Front-End und Back-End kann bei den in GADGET.S1 zusammengestellten Bausteinen der Quellcode der Inhaltsbereiche individuell angepasst werden, sodass für jeden Baustein ein eigenes Modul mit den jeweils spezifisch benötigten Bibliotheken geladen werden kann. Beispiele dafür werden im folgenden Abschnitt gegeben. Weiterhin besteht neben der programmierseitigen Umsetzung auch die Möglichkeit, Datenquellen anzugeben sowie ggf. Einstellungsmenüs zu hinterlegen. Bei allen Bausteinen, deren Daten in der GADGET.DB gespeichert werden, stellt diese die primäre Datenquelle dar. Für Bausteine, in denen bauwerksbezogene Inhalte dargestellt werden, wird das im Rahmen der GADGET.P erstellte und über einen Cloud-Speicher zur Verfügung gestellte LC-Modell als solche genutzt. In 5.5.11 werden darüber hinaus verschiedene Technologien zur Umsetzung der einzelnen Bausteine vorgeschlagen. In der im Rahmen der Forschungsarbeiten zu der vorliegenden Dissertation angefertigten studentischen Abschlussarbeit [Grund, 2018] wurde auf Basis eines MEAN-Stacks ein erster Ansatz zur digitalen Abbildung einer Taktsteuerungstafel entwickelt. Dieser bildet die programmiertechnische Grundlage von GADGET.S2. Damit kann gezeigt werden, dass das in Kapitel 5.5 vorgeschlagene Konzept einer webbasierten Implementierung von GADGET.S umsetzbar ist.

Implementierte Bausteine

Die für GADGET.S wesentlichen Informationsbereiche konnten erfolgreich eingebunden werden. Es wurde gezeigt, dass eine Visualisierung und Benutzerinteraktion mit Bauwerksmodellen, Prozessdaten und Kennzahlen sowie eine übersichtliche Bewertung des Baustellenstatus nach der Ampelsystematik möglich ist. Weiterhin konnten diese Informationsbereiche durch eine gemeinsame Datenhaltung in Form einer NoSQL-Datenbank miteinander verknüpft werden. Diese Verknüpfung wird u. a. daran verdeutlicht, dass durch die Auswahl von Taktbereichen in einem Taktplan eine visuelle Hervorhebung der entsprechenden Bauteile im Gebäudemodell sowie eine gemeinsame, verknüpfte Darstellung von 2D- und 3D-Ansichten im Sinne des visuellen Managements erfolgen können.

Gemäß des in Kapitel 5.5 vorgestellten Ansatzes konnten die einzelnen in [Grund, 2018, S. 88-89] beschriebenen Module (3D-Gebäudemodell, Grundrissplan, Terminplan, Taktplan, allgemeine Baustelleninformationen, Bewertungen, Kennzahlen und Aktionslisten) in entsprechenden Bausteine von GADGET.S2 integriert werden:

- Bauwerksvisualisierung
- Bauablauf
- Interaktiver Taktplan
- Terminplanung
- Kennzahlen
- Qualität & Termintreue
- Ordnung, Sauberkeit, Arbeitssicherheit
- Gegenmaßnahmen
- Projekt- und Baustelleninformation

Verwendete Bibliotheken und Frameworks

Bei der Implementierung wurden die nachfolgenden JavaScript-Bibliotheken eingebunden [Grund, 2018, S. 91-92]:

- **Bauwerksdaten:** Autodesk Forge Viewer [Autodesk, a]. Erweiterbarer und anpassbarer 2D- und 3D-Modelviewer, mit dessen Hilfe Bauwerksmodelle von Servern geladen und dargestellt werden können. Die offenen Bibliotheken erlauben den Zugriff auf die Bauwerksdaten sowie eine Vielzahl bereits implementierter Funktionen. Mit seiner Hilfe können alle in 5.5.11 beschriebenen Anwendungsfälle mit Bezug zur Darstellung und dem Auslesen von Bauwerksmodellen sowie Verknüpfungen zu diesen abgedeckt werden.
- **Terminpläne:** jsGanttImproved [Rodrigues u. a., 2018]. Diese Bibliothek dient der Darstellung von Gantt-Diagrammen, bspw. zur Visualisierung von Rahmenterminplänen. Als Datenbasis dient die GADGET.DB.
- **Kennzahlen:** Chart.js [Evert Timberg, 2018]. Mit Hilfe von Chart.js können verschiedene Typen von Diagrammen auf der Benutzeroberfläche dargestellt werden. Diese können bspw. zur Visualisierung von Kennzahlen genutzt werden. Als Datenbasis dient die GADGET.DB.

An dem Beispiel dieser drei Bibliotheken wird deutlich, wie vielfältig und flexibel die eingesetzten Webtechnologien sind. Über die in [Grund, 2018] verwendeten Bibliotheken hinausgehend

können im Rahmen der Implementierung von GADGET.S2 viele weitere genutzt werden, um die in 5.5.11 beschriebenen Funktionalitäten umzusetzen. Beispiele dafür sind:

- **Dokumentenmanagement:** z. B. Autodesk BIM 360 Docs [Autodesk, c].
- **Datenaufnahme über Kamera (Fotos & Videos), Scannen von QR-Codes:** React Native Camera [Sibelius Seraphini u. a., 2019].
- **Datenaufnahme über Mikrofon (Sprache zu Text):** Web Speech API [Mozilla and individual contributors, 2019].
- **Biometrische Authentifizierung (z. B. Fingerabdrucksensor):** react-native-biometrics [Hines, 2019].
- **Lesen von RFID- & NFC-Tags:** [Bredikhin, 2018], nfc-pcsc [Endler, 2019].



7 Anwendungsbeispiel der Demonstrationsanwendungen GADGET zur Validierung

In diesem Kapitel wird anhand eines fiktiven Beispiels demonstriert, wie die drei Anwendungen GADGET.P, GADGET.S1 und GADGET.S2 in einem Projekt angewendet werden können, um so deren Funktionsweisen und Funktionalitäten aufzuzeigen.

Beschreibung des Anwendungsbeispiels

Im Rahmen eines fiktiven Neubauprojektes sollen zwei neue Gebäude – ein Studentenwohnheim und das neue Bürogebäude L5|09 – an dem Campus Lichtwiese der Technischen Universität Darmstadt (TUDa) gebaut werden. Die TUDa hat mit Projektbeginn definiert, dass das Projekt in einer kooperativen Form und mit einem hohen Digitalisierungsgrad abgewickelt werden soll. In Absprache mit der Bauherrin und den ausführenden Unternehmen haben zwei Bauwerksentwürfe den Zuschlag erhalten, deren Grundrissgeometrien für die Anwendung des Taktungsansatzes geeignet sind. Da die Gebäude direkt an den Bestand angrenzend erstellt werden, ist es der TUDa wichtig, dass alle Anlieger stets umfassend über den Stand der Arbeiten und mögliche Störungen informiert sind.

Zur Erreichung der Projektziele werden mit allen beteiligten Unternehmen sowohl die Anwendung von LC als auch der BIM-Methodik vertraglich vereinbart und in Dokumenten, wie den AIA festgehalten. Gemäß 5.1 und 5.6 werden dazu u. a. die Anforderungen, Anwender (Rollen), Anwendungsfälle und Softwarelandschaft definiert. Bei der Definition der einzusetzenden (Software-) Werkzeuge wird die Arbeit mit dem GADGET-System vereinbart.

7.1 Digitale Taktplanung mit GADGET.P

Auf Basis des digitalen Gebäudemodells des Studentenwohnheims und bei dem Generalunternehmer hinterlegter Aufwandswerte ist die Taktplanung für die drei Gewerke Verputzen, Malerarbeiten und Elektroinstallation durchzuführen. Als Ergebnisse des Ablaufs sollen eine Einteilung des 3. Obergeschosses des Gebäudes in Taktbereiche sowie die benötigten Arbeitsressourcen (Anzahl der Arbeitskräfte) ermittelt werden. Dazu sind von den Anwendenden mehrere Eingaben zu tätigen, auf deren Basis die Berechnung der Takte durchgeführt werden soll.

Die Taktplanung wird kooperativ unter Teilnahme aller an der Ausführung Beteiligter und – je nach Projektstand – im Büro und später auf der eingerichteten Baustelle in einem Besprechungsraum oder Big Room an einem PC mit einem großen Bildschirm oder Beamer durchgeführt.

Beginn der Taktplanung

Zur Ausführung der GADGET.P wird zunächst die Software Revit gestartet und das einzutaktende Bauwerksmodell geöffnet (vgl. Abbildung 7-1). Als Basis für die Taktplanung kommt ein Modell zum Einsatz, welches im Sinne des in Abbildung 5-7 (s. S. 93) vorgestellten Beispielprozesses das Koordinationsmodell darstellt. Durch die Taktplanung werden im weiteren Verlauf LC-bezogene Inhalte darin gespeichert und aus dem Koordinationsmodell somit das LC-Modell erzeugt.

Aus Revit heraus wird dann Dynamo geöffnet, sodass die Revit-spezifischen Befehle aus der Dynamo Revit API bereitstehen. Mit dem Laden des Dynamo Programmcodes wird das in der vorliegenden Forschungsarbeit vorgestellte Skript zur Taktplanung gestartet und auf Basis voreingestellter Standardwerte eine erste Variante der Taktplanung errechnet.



Abbildung 7-1: In Revit geladenes Gebäudemodell des Studentenwohnheims (Eigene Darstellung)

Eingangswerte

Als Eingangswerte in die Berechnung dienen neben dem LC-Modell Benutzereingaben sowie Aufwandswerte. In dem vorliegenden Beispiel werden Aufwandswerte aus Tabellenblatt „s1“ der Excel-Datei „AZRW.xlsx“¹ ausgelesen. In Abbildung 7-2 sind überdies beispielhaft festgelegte Werte (Raster: 3*3, Taktdauer: 5 Tage [d], tägl. Arbeitszeit je Arbeitskraft: 8 Arbeitsstunden [Ah/d], drei Gewerke) dargestellt. Wird eine dieser Größen verändert, so wird die gesamte Berechnung mittels der in 6.1 vorgestellten Softwareanwendung automatisch neu gestartet.

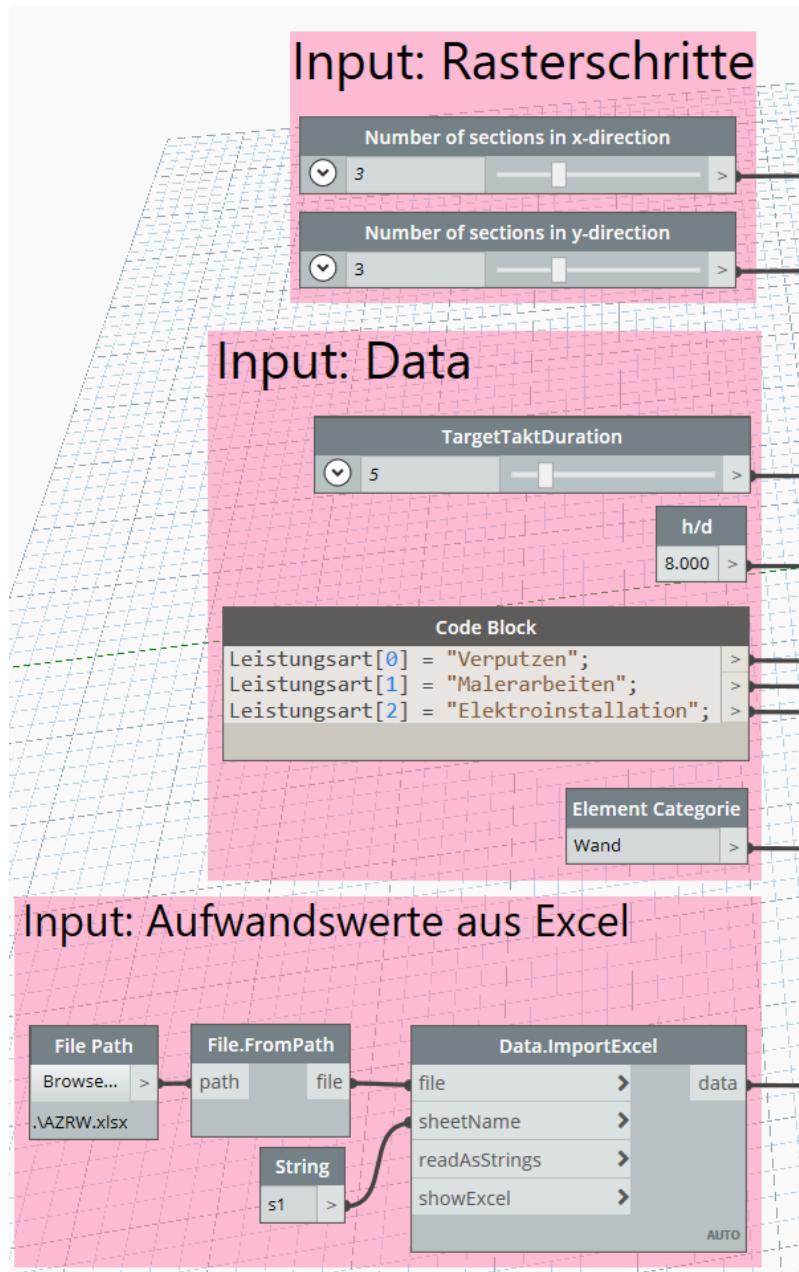


Abbildung 7-2: Dynamo Quellcode der Eingangswerte (Eigene Darstellung)

¹ Die Abkürzung AZRW steht für *Arbeitszeitrichtwerte*, die in Form von Aufwandswerten in der Datei gewerkeweise hinterlegt sind.

Zuordnung von Räumen und Wänden zu Taktbereichen

Wird die Berechnung durch das Ausführen des Skriptes gestartet, so werden die in 6.1.2 beschriebenen Programmschritte ausgeführt. Zur Laufzeit können die Werte aller Knoten nachvollziehbar in der grafischen Darstellung des Algorithmus abgefragt werden.

Beispielhaft werden in Abbildung 7-3 die Einteilung des Grundrisses in ein Raster mit 3*3 Taktbereichen (unten links) sowie die aus dem Gebäudemodell (oben links) ausgelesenen Räume (oben rechts) dargestellt. Das Ergebnis der Zuordnung ist eine farblich markierte Zuordnung aller Wände zu Taktbereichen und Räumen (unten rechts).

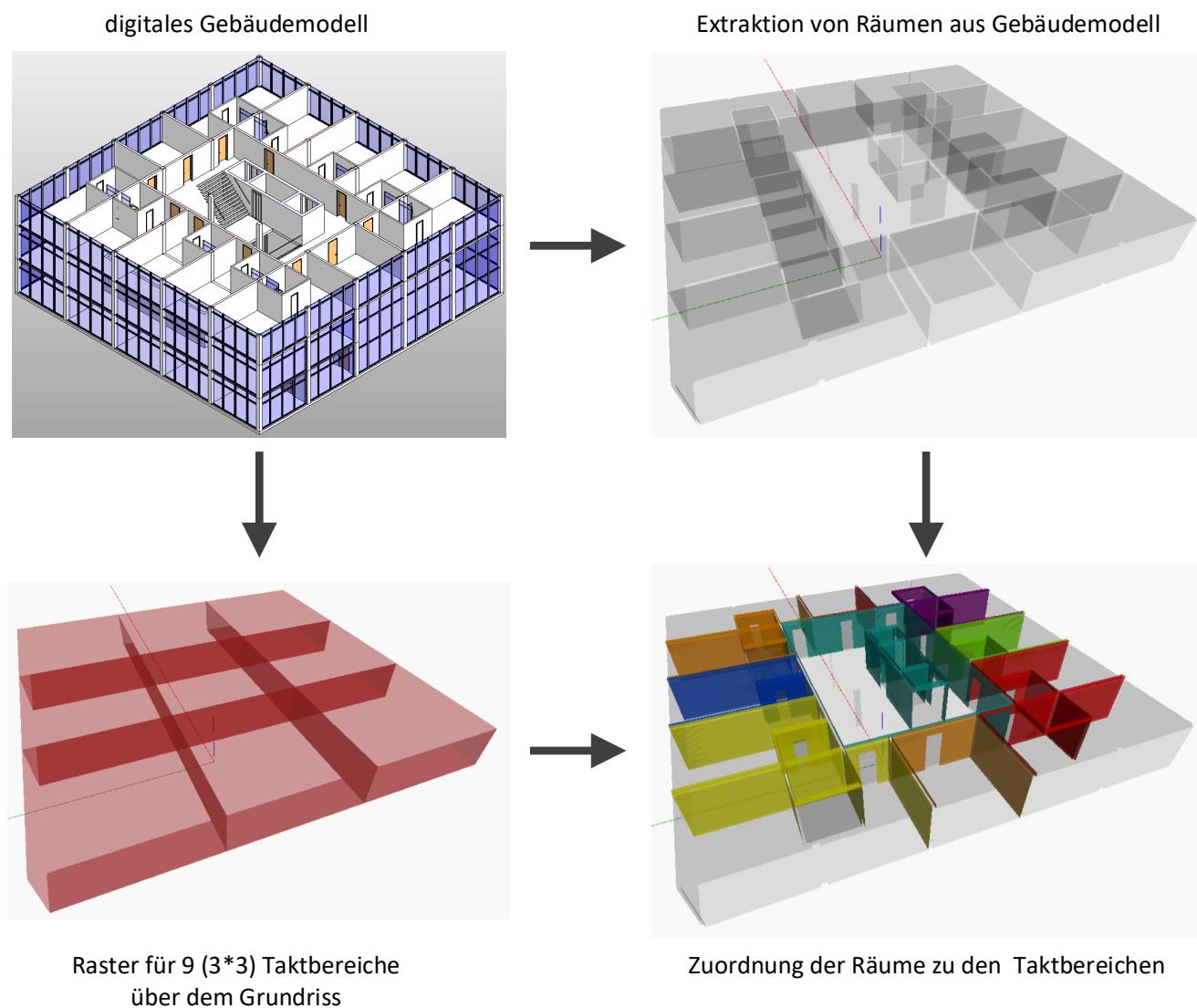


Abbildung 7-3: Ablauf der Erstellung eines Rasters zur Einteilung des Grundrisses in Taktbereiche und Zuordnung von Räumen zu Taktbereichen (Eigene Darstellung)

chieebene) konnte ermittelt werden, dass die folgende Anzahl an Arbeitskräften benötigt wird, um die Arbeiten auszuführen (vgl. Abbildung 7-4):

1. Verputzen: aufgerundet 2 Arbeitskräfte (Index 0, 2. Hierarchieebene)
2. Malerarbeiten: aufgerundet 3 Arbeitskräfte (Index 1, 2. Hierarchieebene)
3. Elektroinstallation: aufgerundet 2 Arbeitskräfte (Index 2, 2. Hierarchieebene)

7.2 Erstellen und Verwalten von digitalen Taktsteuerungstafeln mit GADGET.S1

Mit Hilfe von GADGET.S1 soll als Vorbereitung für die in Kürze beginnenden Arbeiten ein Layout erstellt werden, das in Taktbesprechungen zur Abbildung des aktuellen Baustellenstatus und zur täglichen Bewertung eingesetzt werden kann. An diesem Szenario wird das Vorgehen zur Nutzung von GADGET.S1 im Folgenden beispielhaft illustriert. Darüber hinaus wird zum Abschluss ein weiteres Layout gezeigt, das öffentlich zugänglich sein soll.

Voraussetzungen

Um Anwendern die Erstellung von Layouts zu ermöglichen, werden zunächst serverseitig die Datenbank (MongoDB), Back-End- (Node.js) sowie Front-End- (Angular) Anwendungen gestartet. Im Anschluss daran kann clientseitig über einen gewöhnlichen Webbrowser die auf dem Server laufende Front-End-Anwendung aufgerufen werden.

Ablauf

Die Erstellung von Layouts erfolgt entsprechend der in 5.6.1 definierten Schritte *A.1* bis *C.1*. Wie bei der Taktplanung kommen auch hier alle beteiligten Unternehmen, sowie ggf. Vertreter der Anlieger, zusammen. Sie erfolgt analog zur Taktplanung in einem Besprechungsraum oder Big Room in gemeinsamer Absprache, jedoch geführt durch den GU, der für den Betrieb und die Pflege der GADGET.S verantwortlich ist. Alle Informationen zur Zusammenstellung der Layouts werden auf dem aktuellen Kenntnisstand der Beteiligten basierend erfasst, können im weiteren Verlauf des Projektes jedoch stets angepasst werden.

A.1 Allgemeine Informationen eingeben (s. Abbildung 7-5): Nach Auswählen des Menüpunktes *Layout erstellen* werden im ersten Schritt die gemeinsam ermittelten Informationen zu dem Projekt und zur Anwendung des Layouts in die Eingabefelder eingetragen. Zum Abschluss dieses Schrittes werden die benötigten Sprachen ausgewählt. Standardmäßig werden bereits erste allgemeingültige Bausteine (Sprachauswahl, Uhr, Datumsauswahl) angezeigt.

A.2 Endgeräte & Darstellungsflächen einrichten: Dieser Schritt ist in der Demonstrationsanwendung statisch implementiert. Es ist daher keine Aktion von den Anwendern erforderlich. Die einzurichtende GADGET.S besitzt eine festgelegte Größe von 1920 Pixel * 1080 Pixel. Diese

Standardauflösung ist auf den im Projekt eingesetzten Touchscreens und Monitoren darstellbar und ausreichend für den beschriebenen Anwendungsfall.

A.3 Beteiligte Rollen auswählen (s. Abbildung 7-6): In diesem Schritt werden aus der Menge aller dem Projekt hinterlegten Rollen diejenigen über das Eingabefeld ausgewählt, die an Taktbesprechungen teilnehmen, die also mit diesem Layout arbeiten sollen.

A.4 Datenquellen auswählen (s. Abbildung 7-7): Zur Ermittlung der anzuzeigenden Bausteine werden aus allen dem Projekt hinterlegten Datenquellen die für Besprechungen relevanten ausgewählt. Mit dem Aktivieren einer Datenquelle werden automatisch alle dadurch möglichen Bausteine geladen und überlagert am linken Rand dargestellt.

B.1 Bausteine auswählen (s. Abbildung 7-8): Da für die Taktbesprechungen möglichst viele Informationen vorliegen sollen, werden von den Anwendern alle auf Basis der definierten Rollen und Datenquellen möglichen Bausteine ausgewählt (vgl. vollständige Konfiguration in Abbildung 7-9).

B.2 Bausteine auf Darstellungsfläche platzieren (s. Abbildung 7-8 & Abbildung 7-9): Die Bausteine werden inhaltlich gegliedert auf der Darstellungsfläche angeordnet. So sind alle wichtigen Informationen sofort ersichtlich. In dem oberen linken Bereich werden Prozesse und Termine zusammengefasst. Zur interaktiven Visualisierung nimmt die Darstellung des Gebäudemodells einen großen Teilbereich ein. Einerseits wird es in einer 3D-Ansicht zur intuitiven Visualisierung der Arbeitsinhalte (Bauteile) innerhalb des ausgewählten Zeitraums / Taktes sowie andererseits zur Darstellung der Taktabschnitte mittels 2D-Ansicht platziert. Auf der rechten Seite werden die Bausteine zur Bewertung und Auswertung des Baustellenstandes gruppiert.

Abbildung 7-8 zeigt Bausteine, die halbtransparent dargestellt werden. Diese wurden von den Anwendern noch nicht verschoben und würden beim Speichern des Layouts als nicht benötigte Elemente nicht berücksichtigt.

B.3 Berechtigungen je Baustein vergeben (s. Abbildung 7-8): Für viele Bausteine können Berechtigungen (Lesen / Editieren) vergeben werden. Beispielhaft wird dies in Abbildung 7-8 für den Baustein *Ordnung, Sauberkeit, Arbeitssicherheit* gezeigt. Diesen dürfen alle für dieses Layout hinterlegten Anwender *Lesen*, d. h. ihnen werden die im Inhaltsbereich darzustellenden Inhalte angezeigt. Für das Eintragen der Statusbewertungen ist die Bauleiterin verantwortlich. Sie kann ggf. vom Polier vertreten werden. Sind andere Anwender in dem System angemeldet, so sollen sie keine Bewertungen vornehmen können.

B.4 Detaillierungsgrade & Ansichten je Baustein einstellen (s. Abbildung 7-8): In der Demonstrationsanwendung kann zwischen drei pauschalen Detaillierungstiefen der zur Ausführung benötigten Informationen gewählt werden. Für eine differenziertere Abstufung müssen im Projektkonsortium Vereinbarungen hinsichtlich der anwendungsfallspezifischen Detaillierung von Informationen gemäß des LoI-Prinzips (vgl. 2.3.2) getroffen werden.

C.1 Layout speichern (s. Abbildung 7-8): Nachdem die Konfiguration für alle Beteiligten zufriedenstellend abgeschlossen ist, wird das Layout mit seinen Bausteinen und allen eingegebenen Informationen gespeichert. Mit Betätigen des entsprechenden Buttons wird ein Eintrag in die GADGET.DB geschrieben.

Layout zur Information der Anlieger und Öffentlichkeit

Das in Abbildung 7-10 dargestellte Layout ist weniger umfangreich als das zuvor beschriebene. Auch können hier keine Änderungen an den Daten vorgenommen werden. Informationen werden in einer geringen, für diesen Anwendungsfall ausreichenden Detaillierungstiefe dargestellt.

Abschluss der Einrichtung

Zum Abschluss der Besprechung zur Einrichtung der Layouts überprüfen die Anwenderinnen und Anwender nochmals alle erstellten Layouts. Dazu lassen sie sich die Übersichtsliste durch Aufrufen des Menüpunktes *Übersicht* anzeigen. Neben der in Abbildung 7-12 abgebildeten Detailansicht aller gespeicherten Informationen eines Layouts kann analog zur Erstellung im unteren Bereich der Übersicht der Aufbau der Bausteine angezeigt werden.

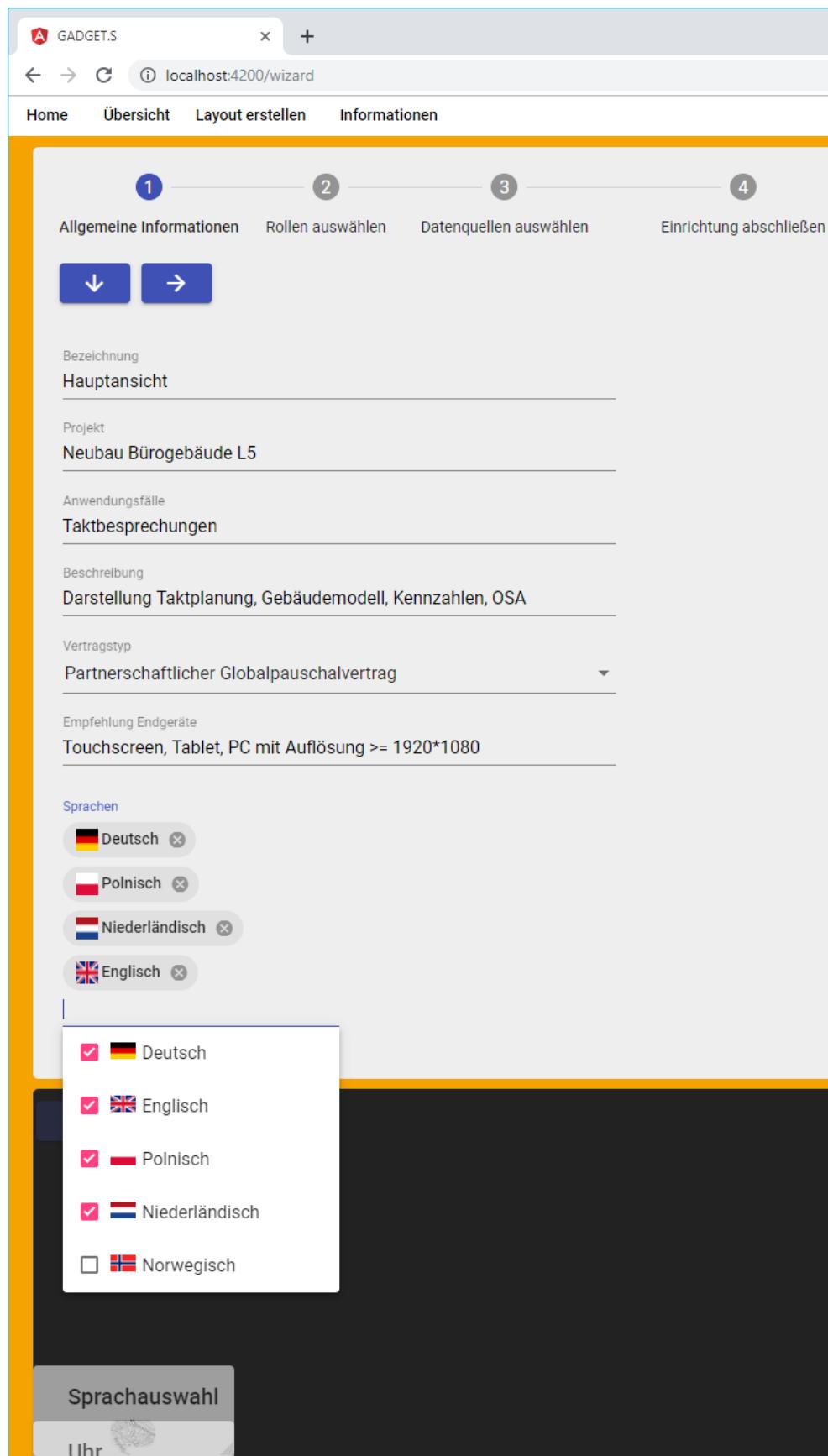


Abbildung 7-5: GADGET.S1 – Erstellen von Layouts – Schritt 1 (Eigene Darstellung)

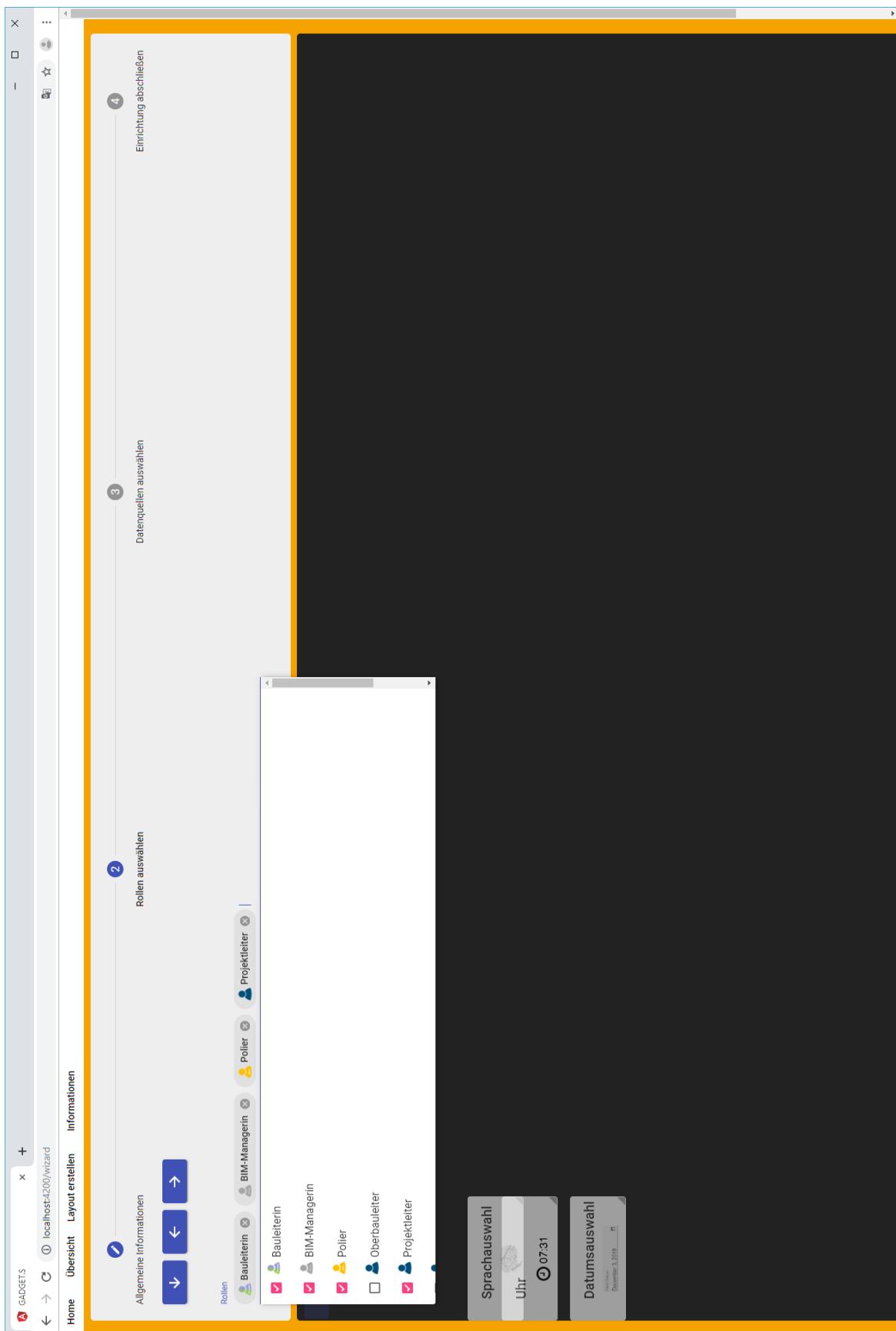


Abbildung 7-6: GADGET.S1 – Erstellen von Layouts – Schritt 2 (Eigene Darstellung)

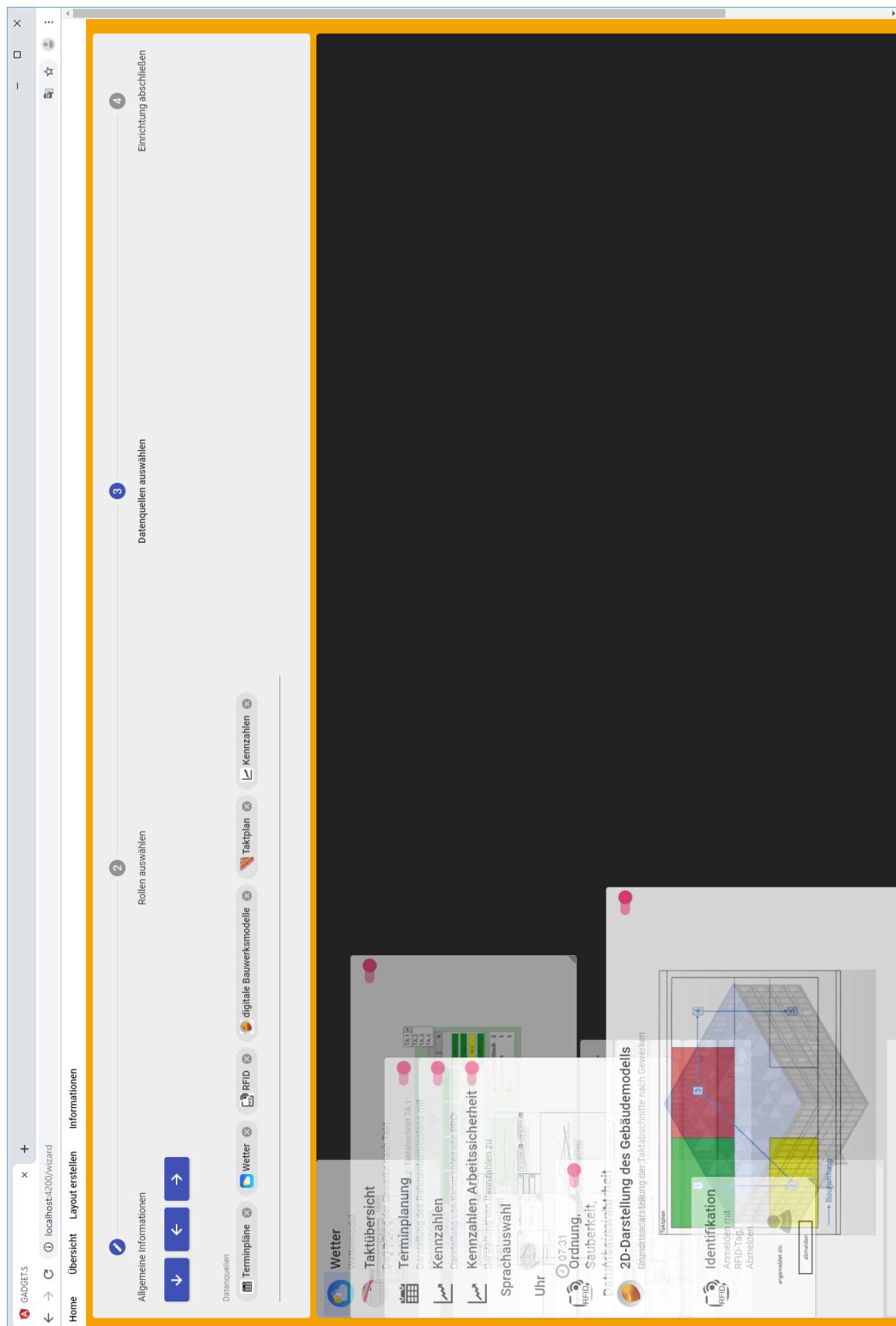


Abbildung 7-7: GADGET.S1 – Erstellen von Layouts – Schritt 3 (Eigene Darstellung)



Abbildung 7-8: GADGET.S1 – Erstellen von Layouts – Auswählen, Konfigurieren und Platzieren von Bausteinen (Eigene Darstellung)

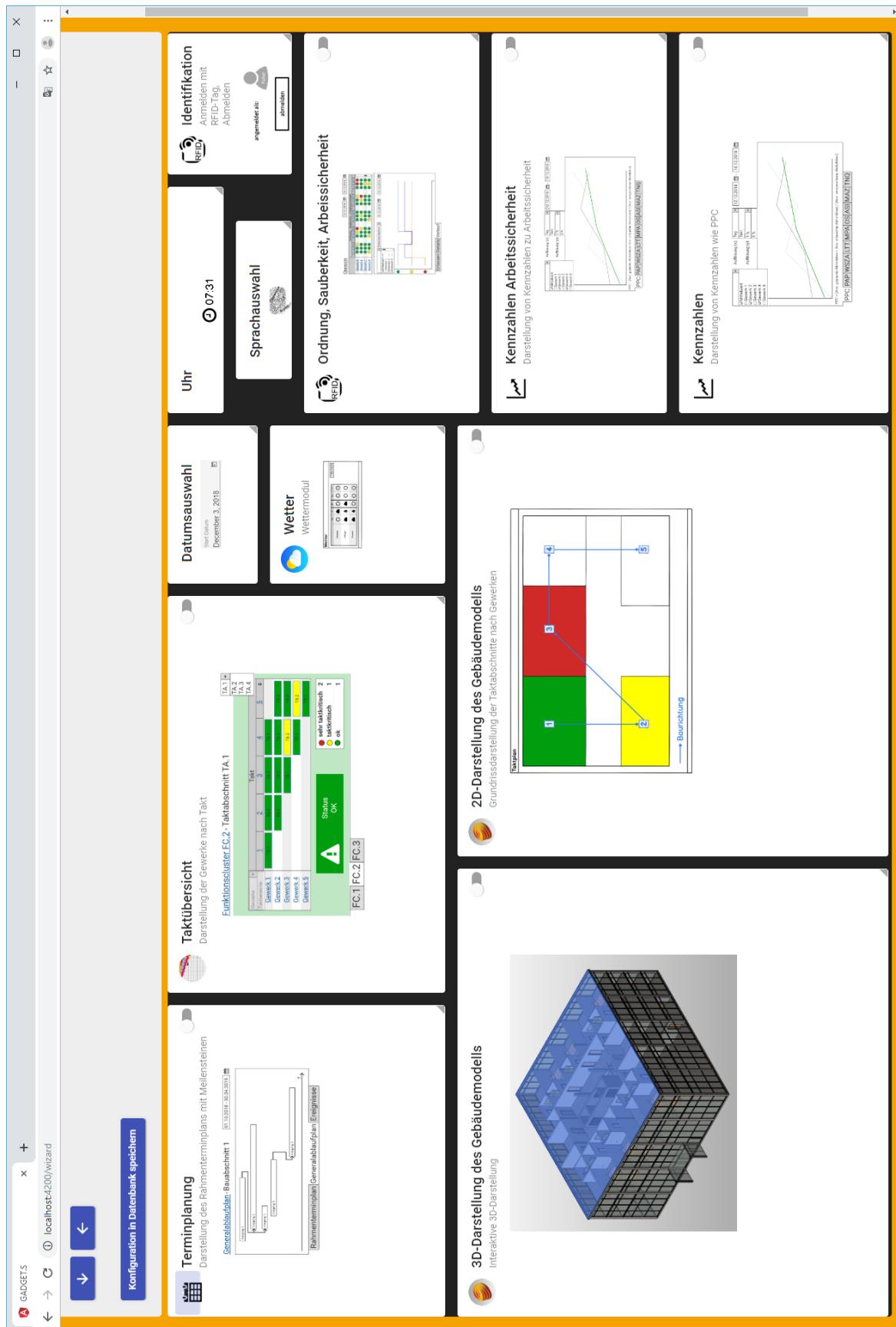


Abbildung 7-9: GADGET.S1 – Vollständige Konfiguration des Layouts für Taktbesprechungen (Eigene Darstellung)

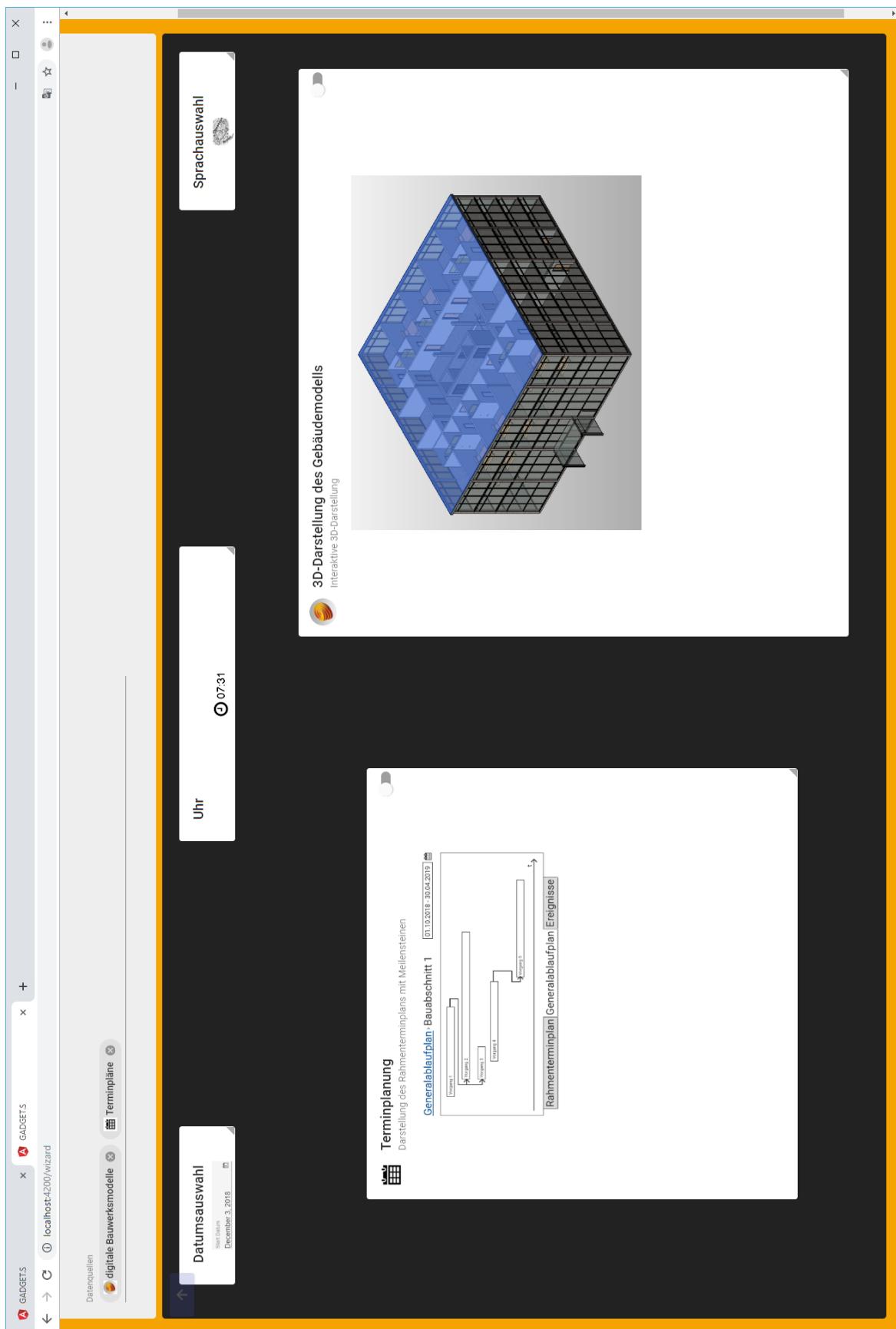


Abbildung 7-10: GADGET.S1 – Vollständige Konfiguration des Layouts zur Information der Anlieger und Öffentlichkeit (Eigene Darstellung)

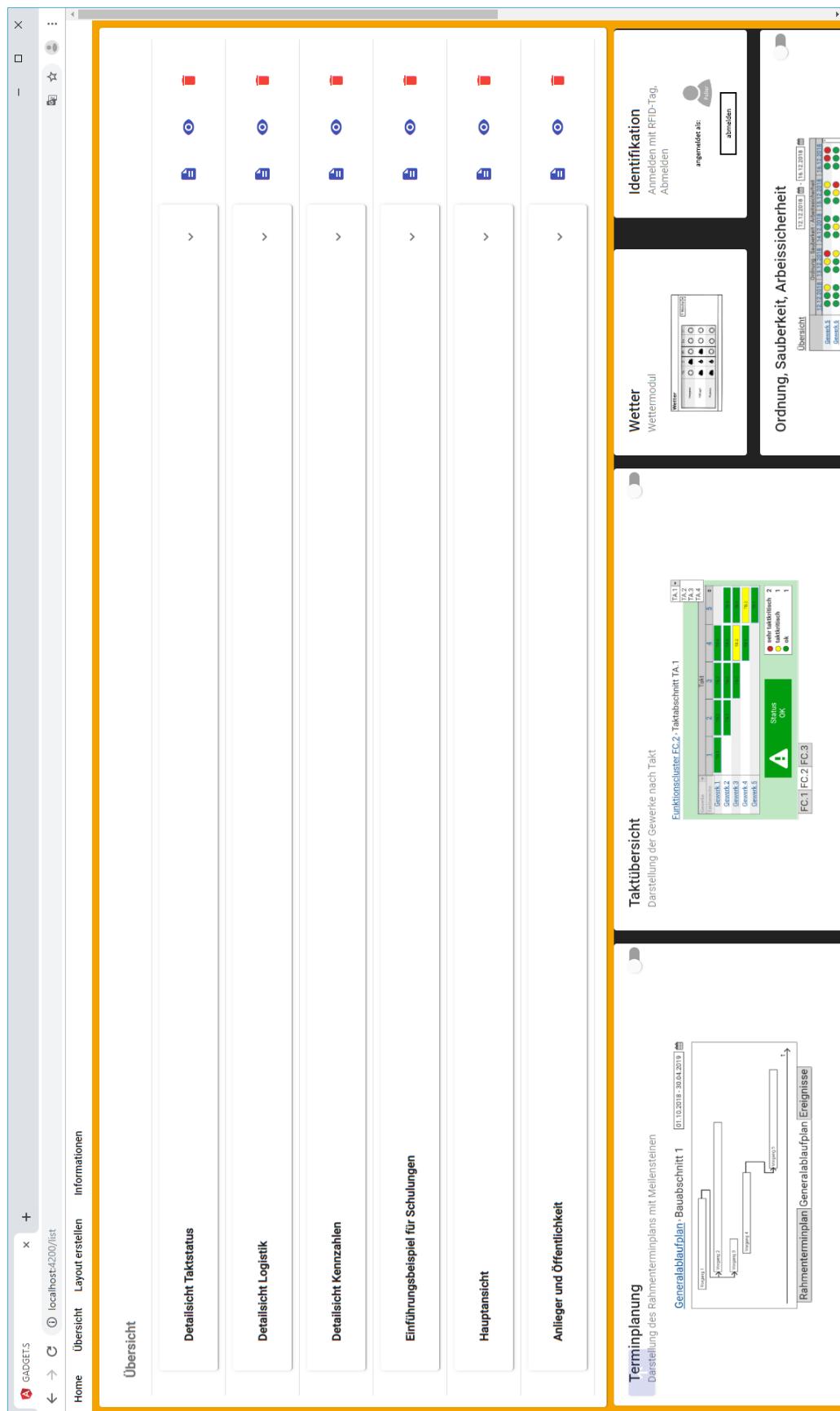


Abbildung 7-11: GADGET.S1 – Liste gespeicherter Layouts (Eigene Darstellung)

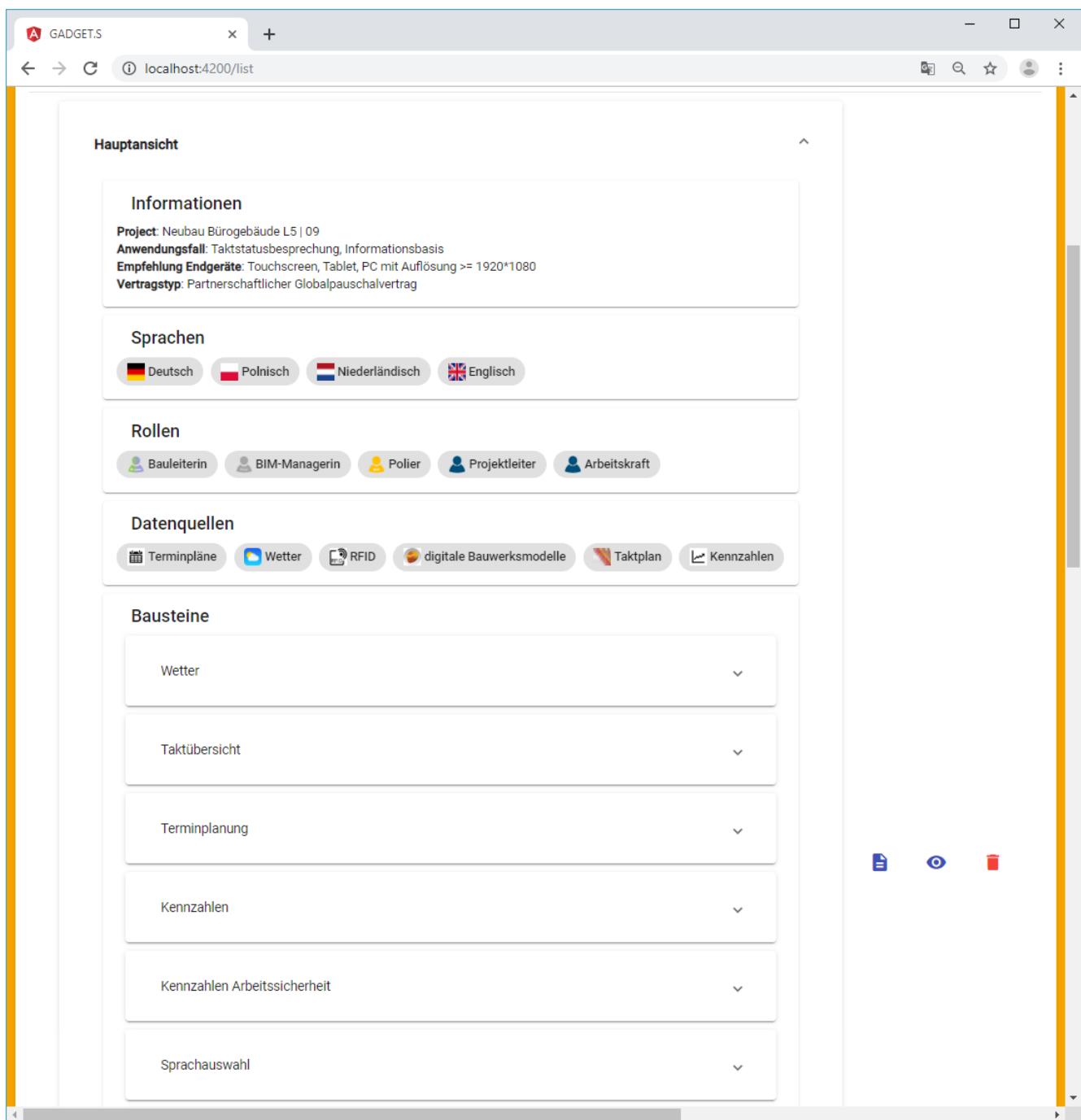


Abbildung 7-12: GADGET.S1 – Detailansicht eines gespeicherten Layouts (Eigene Darstellung)

7.3 Digitale Taktsteuerung mit GADGET.S2

Nachdem vorbereitend mit Hilfe von GADGET.S1 ein Layout für die täglichen Taktbesprechungen zur Übersicht und Bewertung des Baustellenstandes auf der Baustelle zusammengestellt wurde, soll dieses mit Projektbeginn zur Anwendung kommen und in den Besprechungen eingesetzt werden.

Anhand dieses Beispiels wird aufgezeigt, wie GADGET.S2 in der Praxis angewendet werden kann und dass die implementierten Funktionalitäten Besprechungen unterstützen, da Abläufe vereinfacht und Prozesse automatisiert werden.

Voraussetzungen

Bis zu dem Beginn der Ausführungsphase werden die zum Betrieb von GADGET.S2 benötigten Geräte angeschafft resp. zu der Baustelle geliefert. Für die Taktbesprechungen werden dazu drei robuste Touchscreen-Systeme (Touchscreen, Einplatinencomputer mit WLAN-Chip) mit Staub- und Witterungsschutz angeschafft, damit in jedem der drei Taktabschnitte der Baustelle des Bürogebäudes L5 | 09 ein solches System platziert werden kann und drei Gewerkezeuge parallel arbeiten können. Die Systeme können über das Baustellen-WLAN mit dem GADGET.S-Server kommunizieren.

Softwareseitig muss analog zu GADGET.S1 ein Server das Back-End sowie die GADGET.DB und die Front-End-Anwendung bereitstellen, sodass durch Webbrower auf das System zugegriffen werden kann. Der Server muss sich nicht auf der Baustelle befinden, sondern lediglich über das Internet erreichbar sein.

Inhalte

Das in dem folgenden Anwendungsbeispiel genutzte Layout (s. Abbildung 7-13) umfasst die Implementierung miteinander verknüpfter Bausteine, die den Anwenderinnen und Anwendern verschiedene Möglichkeiten zur Interaktion geben. Sie sind über ein in der Cloud-Anwendung Forge hinterlegtes Gebäudemodell sowie die GADGET.DB miteinander verknüpft.

Kopfzeile: Anzeige des aktuellen Projektes, des aktiven Anwendungsfalls, des geladenen Layouts, Bereitstellung eines Suchfelds sowie Einstellungsmenüs.

Datumsauswahl: In Abhängigkeit des eingestellten Datums werden alle ablaufbezogenen Inhalte der anderen Bausteine (Terminplan, Taktplan, Kennzahlen) dargestellt.

Interaktiver Taktplan: Mit dem Modell verknüpfter, interaktiver Taktplan, bei dem durch Auswahl (Toucheingabe oder Mausklick) eines Gewerkes dieses in den 3D- sowie 2D-Ansichten farblich hervorgehoben wird.

Interaktiver Terminplan: Bauteilbezogene Visualisierung per Toucheingabe / Mausklick ausgewählter Taktabschnitte und -bereiche sowie einzelner Arbeitspakete in den beiden Modellansichten.

Interaktive 3D-Darstellung des Gebäudemodells: Möglichkeit zur bauteilbezogenen, farblichen Hervorhebung der Gewerkeverteilung, einzelner Gewerke sowie der Taktabschnitte und -bereiche.

Interaktive 2D-Darstellung des Grundrisses: Bereitstellung von Visualisierungsmöglichkeiten wie in der 3D-Ansicht und zusätzlicher Darstellung der Arbeitsrichtung und der Standorte der GADGET.S-Systeme.

Interaktive Bewertung: Eine nach Gewerken gegliederte Übersicht gemäß der Ampelsystematik, die die tägliche Bewertung der Arbeitssicherheit für den aktuellen Takt per Benutzereingabe (Touch/Klick auf entsprechendes Feld) ermöglicht.

Interaktive Diagramme: Visualisierung der Verläufe der Bewertungen von Arbeitssicherheit und der PPC-Kennzahl in Diagrammen in Abhängigkeit des eingestellten Zeitraums.

Weitere Inhalte: Aktuelles Wetter am Standort, aktuelle Uhrzeit, Anzeige der/des eingeloggten Benutzerin/Benutzers.

Datenquellen

Nach dem initialen Einrichten aller Datenquellen (bspw. Verknüpfung zum CDE, weiteren Cloud-Plattformen, oder Wetterdiensten) und dem konkreten Zuordnen von Anwenderinnen und Anwendern zu den vorgesehenen Rollen ist GADGET.S2 einsatzbereit. Als digitales Bauwerksmodell kommt das LC-Modell zum Einsatz, in dem im Rahmen der Taktplanung bereits mit den zuständigen Gewerken und Takten verknüpfte Taktabschnitte und -bereiche definiert sowie die Baurichtung hinterlegt wurde.

Ablauf einer Taktbesprechung mit GADGET.S2

An dem Ende Oktober 2018 begonnenen Innenausbau von Taktabschnitt 1 (Giebelseite West) des Bürogebäudes L5 | 09 sind die vier Gewerke Fenster, Elektro, Heizung/Sanitär und Trockenbau/Lüftung beteiligt. Jeweils ein Vertreter der Gewerke, die Bauleiterin und der Projektleiter treffen sich am 22.11.2018 um 7:10 Uhr zur morgendlichen Taktbesprechung an der GADGET.S im Taktabschnitt. Der Projektleiter meldet sich an dem System an. Für diese Uhrzeit ist standardmäßig als Anwendungsfall die *Taktbesprechung* mit dem Layout *Hauptansicht* hinterlegt. Daher wird dieses Layout nach dem Anmelden automatisch geöffnet und es werden die ausgewählten Bausteine mit den eingestellten Informationstiefen dargestellt.

Der Projektleiter wählt zur Einleitung der Besprechung in dem Terminplan den aktuellen Taktabschnitt aus und zoomt in der 2D-Ansicht des LC-Modells auf die vier aktuellen Taktbereiche, deren Abfolge (Baurichtung) durch rote Pfeile visualisiert wird. Es ergibt sich die in Abbildung 7-13 dargestellte Ansicht.

Im Anschluss erfolgt die gemeinsame Bewertung der Gewerke nach der Ampelsystematik². Durch Auswählen des jeweiligen Gewerks in dem Taktplan wird die Ansicht in den beiden Mo-

² Der Übersicht halber wird dies an dem Beispiel der Arbeitssicherheit illustriert. Weitere Bewertungen hinsichtlich Qualität, Termintreue etc. erfolgen analog.

delviewern so angepasst, dass die von diesem herzustellenden Bauteile hervorgehoben werden. Die Bewertung erfolgt in dem entsprechenden Baustein und wird sofort in der GADGET.DB hinterlegt. So können die Verlaufsdiagramme umgehend aktualisiert und Kennzahlen automatisch berechnet werden.

Falls notwendig, bspw. bei Gefährdung des Taktes oder mangelhaft erbrachten Leistungen, erlauben die interaktiven Modelviewer eine exakte Lokalisierung und Visualisierung (vgl. Abbildung 7-14). So können die betroffenen Bauteile genauer betrachtet und Gegenmaßnahmen fundiert besprochen werden.

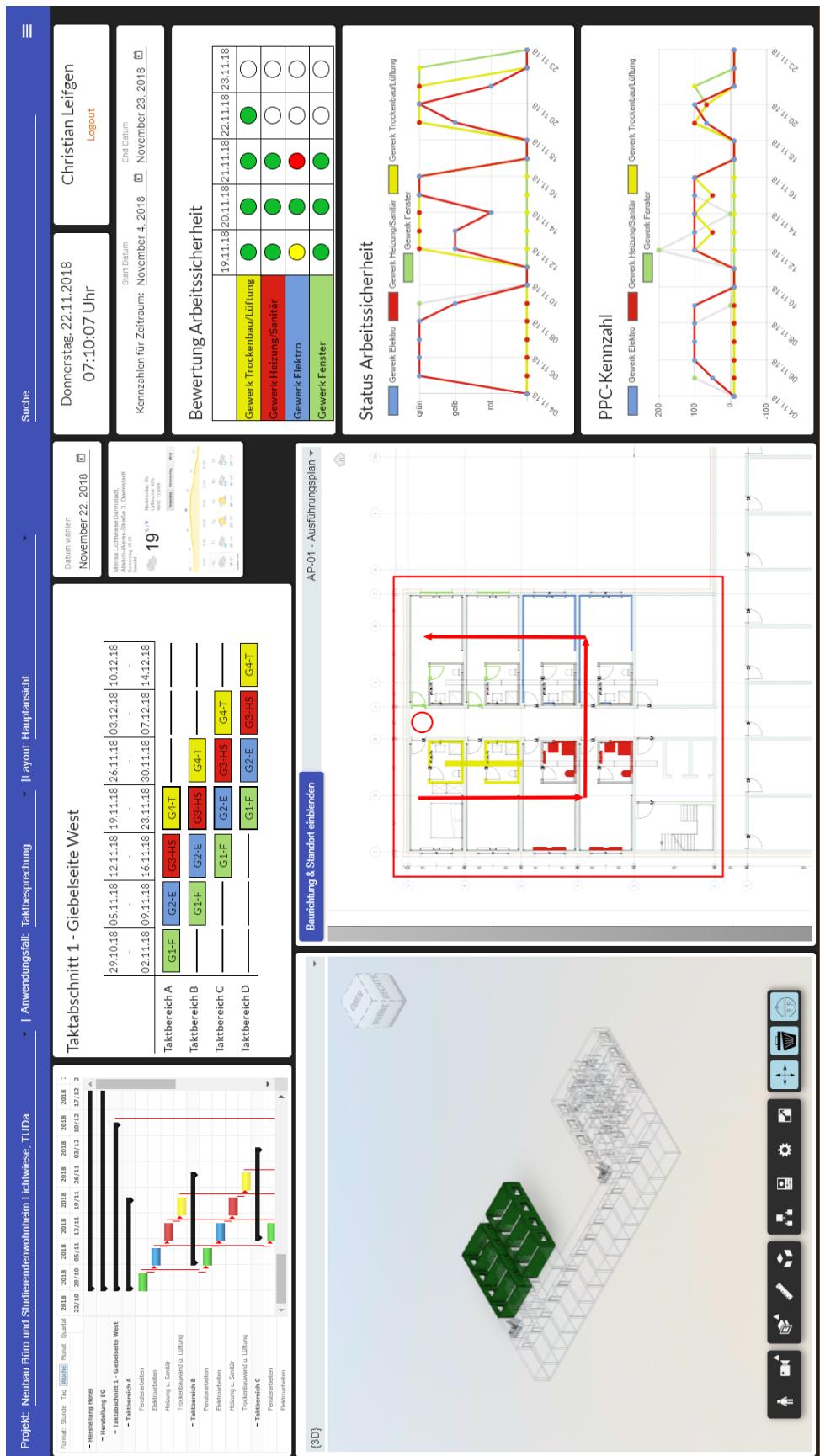


Abbildung 7-13: GADGET.S2 – Beispielhafte Anwendung des mittels GADGET.S1 erstellten Layouts zur Taktbesprechung (Eigene Darstellung, Implementierung aufbauend auf [Grund, 2018])



Abbildung 7-14: GADGET.S2 – Beispielhafte Anwendung des mittels GADGET.S1 erstellten Layouts zur Taktbesprechung – Details (Eigene Darstellung, Implementierung aufbauend auf [Grund, 2018])



8 Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

In dem Analyseteil dieser Dissertation wurde erarbeitet, dass im Bauwesen starker Bedarf und große Potentiale hinsichtlich der Schaffung von Produktivitätssteigerungen durch Veränderungen der Arbeitsweisen bestehen. Die Basis dafür kann eine über die gesamte Wertschöpfungskette kooperativ umgesetzte, integrierte, und ganzheitliche Kombination des LC-Ansatzes mit digitalen Methoden und Technologien, wie insb. der Einbindung in die BIM-Methodik, bilden.

In der Sphäre des Baustellenmanagements wurde der Taktungsansatz als eine in der Praxis bereits häufig angewandte Methode identifiziert und hinsichtlich der Möglichkeiten zur digitalen Unterstützung untersucht. Aufbauend auf diesen Untersuchungen wurde ein Konzept eines Softwaresystems entwickelt, das im Rahmen der Ausführungsvorbereitung und Bauausführung einen Ansatz zur digitalen Transformation der Taktplanung und -steuerung darstellt. Darin werden Überschneidungen der LC mit der BIM-Methodik aufgegriffen, sodass Synergien beider Ansätze genutzt werden können. Das System kann im Sinne einer vollständig digital abgebildeten Wertschöpfungskette im Bauwesen verschiedene Datenquellen integrieren und selbst in CDEs integriert werden. Innerhalb der beschriebenen Anwendungen wird durch die Nutzung einer gemeinsamen Datenbank, GADGET.DB, und eines LC-Modells ein durchgängiger Datenfluss sichergestellt, der durch die Verknüpfung mit anderen Systemen über das gesamte Projekt hinweg erweitert werden kann.

Das System GADGET besteht aus einer Software zur Unterstützung der Taktplanung (GADGET.P) sowie einer modular aufgebauten Software zur Abdeckung mehrerer Anwendungsfälle mit dem Fokus auf der Taktsteuerung (GADGET.S). GADGET.S ist dabei an das zentrale Werkzeug zur Umsetzung der Taktsteuerung, Taktsteuerungstafeln, angelehnt und besteht aus zwei aufeinander aufbauenden Teilanwendungen. Alle Bestandteile von GADGET wurden in den Projektkontext eingeordnet, um deren Anwendung in Projekten nachvollziehen zu können. GADGET basiert dabei auf der Berücksichtigung grundlegender Prinzipien aus der LC, wie den Fließ-, Takt-, Zieh- und Null-Fehler-Prinzipien sowie dem visuellen Management, und unterstützt deren Umsetzung während der Arbeitsplanung und -steuerung.

Überdies wurde vorgestellt, wie die Anwendung von GADGET.S in der Praxis umgesetzt und wie das System in die BIM-Methodik integriert werden kann.

Aufbauend auf dem Konzept wurde mit der Implementierung einer visuelle Programmierung nutzenden und zweier webbasierter Demonstrationsanwendungen, gezeigt, dass das System

technisch umsetzbar ist. Anhand von Anwendungsbeispielen wurde illustriert, wie die Benutzeroberflächen von GADGET aufgebaut sind und wie sich die Bedienung durch Anwenderinnen und Anwender gestaltet. Dazu wurde anhand eines fiktiven Beispielprojektes zunächst eine Taktplanung mit GADGET.P durchgeführt. Im Anschluss daran wurde gezeigt, wie die Zusammenstellung der modularen GADGET.S im Rahmen der Vorbereitung der Taktsteuerung ablaufen kann. In einem dritten Teil wurde abschließend beschrieben, wie eine konkrete Instanz der GADGET.S in einem Projekt zur Durchführung von Besprechungen genutzt werden kann.

8.1.1 Mehrwert der digitalen Transformation von Taktplanung und Taktsteuerung

Mit Anwendung einer modellbasierten Arbeitsweise wird das Bauwerk durch sein digitales Abbild in den Mittelpunkt gestellt und der Fokus damit auf den zu schaffenden Wert gelegt.

Eine Grundlage bildet die Einbindung bestehender Softwaresysteme aus dem BIM-Kontext zur Umsetzung einer digitalen Taktplanung mittels GADGET.P unter Nutzung der in einem LC-Modell gespeicherten bauwerksbezogenen Informationen und deren Verknüpfungen mit weiteren Informationsbereichen.

Aufbauend darauf findet die ebenfalls modellbasierte Taktsteuerung statt. GADGET.S ermöglicht die Umsetzung von über die Taktsteuerung selbst hinausgehenden Anwendungsfällen, wie die Berichterstattung an das Management oder die Information der Öffentlichkeit. Es kann darüber hinaus einen Beitrag dazu leisten, Transparenz zu schaffen und eine kollaborative, gemeinschaftliche Mentalität auf der Baustelle zu fördern.

Der Einsatz dieser digitalen Werkzeuge und die digitale Datenbasis ermöglichen eine verstärkte Anwendung des visuellen Managements. Es können anwendungsfallbezogen und kontextsensitiv Informationen in den richtigen Detaillierungsgraden dargestellt werden. Gemäß des Ziehprinzips werden vom Nutzer nur die Informationen angefordert resp. ihm angezeigt, die er für den jeweiligen Anwendungsfall und Zeitpunkt benötigt. Dies wird durch die in den Bausteinen einstellbaren Detaillierungsstufen der dynamisch gestaltbaren Layouts ermöglicht.

Der Mehrwert einer dynamischen Visualisierung wird an der mit dem Bauwerk verknüpften Darstellung von Taktbereichen und -abschnitten, der aktuellen Arbeiten und deren Beurteilung nach der Ampelsystematik deutlich. Anhand der Nutzung einer visuellen Programmierumgebung zur Taktplanung zeigt sich ebenfalls, wie solche – im Kontext der Bauausführung neuen – Ansätze einen Mehrwert für die Planenden erzeugen können. Abläufe werden vereinfacht, wobei gleichermaßen ein stärkerer (visueller) Bezug zwischen den dahinter liegenden Algorithmen, Anwendern und Arbeitsinhalten geschaffen wird.

Zeitlich hoch aufgelöste, aktuelle und verlässliche Daten ermöglichen die zeitnahe Erkennung, Benachrichtigung und Visualisierung auftretender Probleme in den Herstellungsprozessen. Es entsteht ein konstanter und zuverlässiger Informationsfluss. Dies erlaubt schnelle, automatisier-

te, zielgerichtete und damit effektive Auswertungen im Projektteam zur Fehlerbeseitigung durch den gezielten Einsatz von Gegenmaßnahmen. Die digital vorliegenden Daten können darüber hinaus als Grundlage zur künftigen Vermeidung wiederkehrender Fehler systematisch erfasst werden. Somit wird ein kontinuierlicher Verbesserungsprozess – auch über Projekt- und Unternehmensgrenzen hinweg – gefördert. So wird u. a. das Ziel der Taktplanung und -steuerung unterstützt, das Auftreten gestörter Bauabläufe zu minimieren.

Werden Prozesse und deren Status sowie korrespondierende Kennzahlen digital erfasst und mit digitalen Bauwerksmodellen sowie Ressourcen verknüpft, so können diese deutlich besser nachverfolgt und visualisiert und damit eine kontinuierliche Überwachung und Steuerung der Baustelle gefördert werden. Erfolgt dazu eine Einordnung der Prozesse hinsichtlich ihres Wertschöpfungsanteils, so erlaubt die GADGET.S eine Visualisierung der aktuellen Wertschöpfungs- und Verschwendungsverteilung sowie deren Verlauf über das gesamte Projekt.

Überdies kann die transparente Darstellung von Informationen und das gemeinsame Arbeiten aller Beteiligten an einem System einen offenen Umgang mit Fehlern fördern und das Gemeinschaftsgefühl stärken. Dazu trägt auch bei, dass die Kommunikation innerhalb von Projekten auf einer einheitlichen Datengrundlage aufbaut und dadurch ebenfalls transparent wird. Informationen werden nachvollziehbar für alle hinterlegt, sodass Absprachen klar festgehalten und von allen Betroffenen eingesehen werden können.

Als Bestandteil der digitalen Projektabwicklung stellt GADGET.S eine zentrale Schnittstelle zwischen vielen Beteiligten und einer Vielzahl heterogener Informationen dar. Ihre Anwendung muss daher im Kontext der Anwendung der BIM-Methodik sowohl vertraglich als auch technisch und organisatorisch geregelt werden. Um eine ganzheitliche digitale Umsetzung zu schaffen, ist nicht nur ihr Einsatz während der Ausführungsphase, sondern ebenso bereits ihre Einrichtung Teil des vorgestellten Konzeptes.

Durch das Arbeiten auf einer digitalen, in ein CDE eingebetteten Datengrundlage wird es ermöglicht, schon während der Einrichtung Randbedingungen automatisch überprüfen zu lassen und so bspw. den Einsatz von Bausteinen zu verhindern, für die keine Datenquellen vorliegen. Auch können bidirektionale Verknüpfungen zu Dokumenten, wie dem BAP hergestellt werden. Bereits erstellte Inhalte daraus können aufgegriffen werden, um vorhandene Datenquellen automatisch zu identifizieren und beteiligte Rollen, allgemeine Projektinformationen oder Anwendungsfälle abzuleiten. Durch die Anwendung der GADGET.S neu hinzukommende Informationen können wiederum in entgegengesetzter Richtung automatisiert darin hinterlegt werden.

8.1.2 Einordnung

Inwieweit die beschriebenen Effekte der Verbesserung bestehender Arbeitsweisen und Steigerung von Effizienz und Produktivität durch die Anwendung der GADGET.S in der Praxis zum

Tragen kommen und ob alle vorgestellten Möglichkeiten dazu ausgenutzt werden können, kann nicht vollständig auf Basis einer theoretisch-akademischen Diskussion und eines fiktiven Anwendungsbeispiels ermittelt werden. Tiefergehende Anhaltspunkte können umfangreiche Experten-interviews geben. Eine endgültige Bewertung ist jedoch nur durch eine umfassende Durchführung von Studien in realen Projekten möglich. Gerade eine Ermittlung erzielbarer Effizienzgewinne und damit einhergehender Produktivitäts- und Wertschöpfungssteigerungen lassen sich quantitativ nur unter realen Projektbedingungen mit einer ausreichend großen Datengrundlage ermitteln. Dasselbe gilt für die Akzeptanz bei Planenden und dem Baustellenpersonal, die sich nur unter realen Projektbedingungen untersuchen lässt.

Nichtsdestotrotz konnte bereits durch die Implementierung einer Demonstratoranwendung gezeigt werden, dass sich viele Prozesse und Arbeitsinhalte durch eine vollständig digitale Abbildung und den verstärkten Einsatz von Software sowie neuer Technologien gegenüber der herkömmlichen gemischt analog-digitalen Arbeitsweise verbessern lassen. Abläufe können automatisiert werden, sodass bspw. Informationen mit einem hohen Detaillierungsgrad aufgenommen und verarbeitet und je nach Anwendungsfall passend abstrahiert werden können. Auch sind durch ein vollständig digitales und vernetztes System eine hohe Aktualität der Daten gegeben und ein standortunabhängiger Zugriff möglich. Automatismen, wie das kontextsensitive Darstellen von Informationen – bspw. zu bestimmten Uhrzeiten oder für bestimmte Personen – erlauben es der Bauleitung darüber hinaus, den Fokus auf die eigentlichen Arbeitsinhalte zu legen und weniger Zeit mit organisatorischen Tätigkeiten, die im Sinne der LC nicht wertschöpfend sind, zu verbringen.

8.2 Ausblick

Die Weiterentwicklung des in dieser Dissertation beschriebenen GADGET-Systems und dessen Einführung in die Praxis kann in drei Stufen erfolgen. Zunächst kann die Demonstrationsanwendung unter Einbeziehung weiterer digitaler Technologien und Praxispartner zu einem Prototyp weiterentwickelt werden. Dieser sollte im Anschluss in realen Projekten eingesetzt werden, um quantitative und qualitative Aussagen hinsichtlich erreichbarer Effizienz-, Produktivitäts- und Wertschöpfungssteigerungen, erzielbarer Verschwendungsreduktionen und erforderlicher Anpassungen zu erhalten. Auf dieser Basis können Geschäftsmodelle zum Vertrieb des Systems entwickelt werden. Übergeordnet sollte die Zielsetzung stehen, kooperative Strukturen in der Projektzusammenarbeit zu implementieren und so gemeinsam das Ziel der Wertschöpfungssteigerung zu erreichen. Neben der technischen Implementierung sind die ganzheitliche digitale Transformation von Unternehmens- und Projektstrukturen sowie der korrespondierenden Arbeitsabläufe zu forcieren.

8.2.1 Technische Weiterentwicklung von GADGET

GADGET.P

Die Fortführung der Implementierung von GADGET.P kann entsprechend des in 5.4 beschriebenen Ansatzes derart erfolgen, dass ein ganzheitliches System entwickelt wird, das alle Schritte der Taktplanung abdeckt. Das Hauptaugenmerk sollte dabei auf der Entwicklung dieser Bestandteile liegen:

- Direkte Anbindung aller notwendigen Datenquellen, sodass bspw. Aufwandswerte aus allgemeinen, branchenweiten oder genaueren, firmeninternen Datenbanken über Webservices abgefragt und Ressourcen berücksichtigt werden können
- Unterstützung der Definition von Taktbereichen und -abschnitten bereits während der Modellierung durch die Auswertung der erstellten Objekte
- Objektorientierte Erweiterung des Algorithmus zur Taktplanung, sodass eine komplexe Einteilung der Taktabschnitte und -bereiche vollständig auf Basis der Modellinhalte und damit verknüpfter Prozesse erfolgen kann
- Entwicklung eines Algorithmus zur optimalen, prozessbasierten Strukturierung der Gewerkesequenzen
- Entwicklung eines – ggf. graphbasierten – Algorithmus zur Festlegung von Gewerkezügen und der optimalen Baurichtung / -abfolge
- Permanente Durchführung von Plausibilitätsprüfungen in allen Schritten der Taktplanung, verbunden mit visuellen Hinweisen und Handlungsempfehlungen bei Problemen

GADGET.S

Der modulare Aufbau von GADGET.S stellt eine technische Grundlage bereit, die durch weitere digitale Technologien erweitert werden kann. Dies kann dazu beitragen, Prozesse weiter zu optimieren und Verschwendungen (Wegezeiten, Ausführungsfehler etc.) zu reduzieren. Beispiele solcher Technologien sind Augmented Reality (AR), Verfahren zur Positionsbestimmung und Virtual Reality (VR).

Der Einsatz von **AR** ermöglicht die Verknüpfung realer Bauwerke mit deren digitalen Modellen direkt am Ort der Wertschöpfung. Dadurch lässt sich ein starker Bezug zwischen Bauwerk und den Arbeitsinhalten schaffen.

- Herstellungsprozesse (Prozessbeschreibung, benötigte Ressourcen, geplanter Takt) können vor Ort an Bauteilen visualisiert werden, sodass ein verstärkter Bezug von Bauwerk zu Prozessen hergestellt wird.

- Die Visualisierung der Herstellungsprozesse kann nach Arbeitspaketen je Gewerk gegliedert werden und so als tägliche Gesprächsbasis der anstehenden Aufgaben direkt in das Bauwerk eingeblendet werden.
- Gewerksequenz und Gewerkezeuge können direkt im Bauwerk dargestellt werden, sodass die Absprache zwischen den Gewerken verbessert und direkt auf Basis des Bauwerks erfolgen kann.
- In den Taktbesprechungen zur Planung der kommenden Wochen kann eine dreidimensionale Animation der durchzuführenden Arbeiten auf der Baustelle dienen, um so Abhängigkeiten zu erkennen und die Baufreiheit der Gewerke sicherzustellen.
- Auch kann die Baustellenlogistik im Bauwerk visualisiert werden, um so Wege und Lagerflächen abzusprechen und zu prüfen, ob theoretisch ermittelte Wege auch tatsächlich umsetzbar sind.
- Der Status der Baustelle (Ampelbewertung der Bereiche Qualität, Termintreue, OSA etc.) kann – bspw. bei Taktbesprechungen – vor Ort in den Taktabschnitten bzw. -bereichen visualisiert werden, sodass ein direkter Bezug der Bewertung zu deren Grundlage (bspw. mangelhaft oder unfertig ausgeführte Leistungen oder unaufgeräumte Arbeitsbereiche) hergestellt werden kann.
- Wie der Baustellenstatus können auch Kennzahlen direkt an einem in das reale Bauwerk projizierten digitalen Bauwerksmodell visualisiert werden.
- Werden Fotografien mit Aufnahmestandort und -ausrichtung verknüpft, so können diese in einer AR-Umgebung direkt im Bauwerksmodell angezeigt werden. Diese können mit den zuvor beschriebenen Visualisierungen kombiniert (bspw. bei mangelhaft ausgeführten Leistungen als Nachweis der Bewertung) werden.

Eine wesentliche Grundlage bei der Herstellung von Bauwerken stellt die räumliche Einordnung der Bauteile und der zur Herstellung notwendigen Ressourcen dar. Werden die **Positionen** von Arbeitsmitteln, Materialien und Personen erfasst, können in (AR-gestützten) Besprechungen u. a.

- Wege analysiert und hinsichtlich ihrer Effizienz bewertet und
- eine aktuelle Visualisierung der Ressourcen zur Veranschaulichung des Baustellenstandes auf GADGET.S angezeigt werden.

Auch der Einsatz von **VR** - Technologien kann in GADGET.S integriert werden. VR-Umgebungen ermöglichen bspw. räumlich verteilte Besprechungen, sodass die – bei analogen Darstellungen nur auf der Baustelle vorliegenden – Informationen zum Baustellenstand mit Bezug zum Bauwerk(smodell) gemeinsam diskutiert werden können.

8.2.2 Herausforderungen einer ganzheitlichen Umsetzung in der Praxis

Hinsichtlich der Einführung und Anwendung des vorgestellten Konzeptes einer digitalen BIM-basierten Taktplanung und -steuerung in der Praxis stehen Herausforderungen auf verschiedenen Ebenen bevor.

Wesentliche Faktoren einer erfolgreichen Einführung sind die Akzeptanz von und Aufgeschlossenheit gegenüber neuen, digitalen Methoden und Werkzeugen derjenigen, die das System bei der Ausübung ihrer Arbeit unterstützen soll. Der Ansatz des Lean Thinking erfordert eine hohe Bereitschaft zu einer offenen, positiven Fehlerkultur. Es bedarf daher wohlüberlegter, sensibler Strategien zur Einführung, bei denen auf die Bedürfnisse der Menschen aller Tätigkeitsbereiche (insb. in der Bauleitung und -ausführung) eingegangen und bei denen alle Mitarbeitenden einbezogen werden. Dabei sollte das Augenmerk nicht nur auf die neuen Möglichkeiten durch das vorgestellte digitale System gelegt werden, sondern vielmehr den bisherigen – gerade auf Baustellen zu großen Teilen analogen – Arbeitsmitteln und -weisen Aufmerksamkeit geschenkt werden. Auch die breite Altersverteilung des Baustellenpersonals muss berücksichtigt werden. Aufgrund des großen Funktionsumfangs müssen die Nutzer der GADGET.S – wie auch bisher bei herkömmlichen Taktsteuerungstafeln – in deren Anwendung geschult werden. Durch Befragungen können verschiedene Bedienkonzepte evaluiert und weitere Anforderungen ermittelt werden.

Aus technischer Sicht bestehen die größten Hindernisse der Implementierung der GADGET.S darin, es allen Projektbeteiligten zu ermöglichen, trotz heterogener Datenformate und uneinheitlicher Datenhaltung auf einer gemeinsamen, einheitlichen Datenbasis zu arbeiten. Es gibt verschiedene Ansätze, diese Daten aus unterschiedlichsten Datenquellen – über das Daten-austauschformat IFC hinausgehend – zusammenzuführen und so softwareunabhängige Datenumgebungen im Kontext der BIM-Methodik aufzubauen [BIMsystems, 2019]. Diese Problemstellung betrifft jedoch nicht nur die Taktplanung und -steuerung im Speziellen, sondern die gesamte digitale Wertschöpfungskette im Bauwesen.

Auch die einzusetzende Hardware kann einen kritischen Punkt bei der praktischen Einführung bilden. Gerade die im Baufeld einzusetzenden Systeme müssen baustellentauglich sein, da sie starken äußeren Einwirkungen, wie Staub, Feuchtigkeit und Stößen ausgesetzt sind. Solche Geräte existieren zwar, jedoch muss auf Basis weiterer Untersuchungen gezeigt werden, wie hoch Effizienzgewinne durch deren Einsatz ausfallen und ob sich die Kosten amortisieren können.

Auf organisatorischer Ebene muss in Bauprojekten – analog zu der Definition der Verantwortlichkeiten bei der Implementierung der BIM-Methodik – klar definiert werden, wer für die Pflege der GADGET.S verantwortlich ist. Unterstützend sollten Vereinbarungen zu einer gemeinsamen, kollaborativen Zusammenarbeit abgeschlossen werden.

Überdies kann die Weiterentwicklung übergeordneter normativer, juristischer und politischer Rahmenbedingungen im Bauwesen eine ganzheitliche Anwendung innovativer digitaler Ansätze über die gesamte Wertschöpfungskette im Bauwesen fördern. Durch die Unterstützung übergreifender, integrierter Herangehensweisen kann das volle Potential von Systemen wie GADGET genutzt werden.

A Anhang

A.1 Weitere Bausteine

Interaktive Bauwerksmodelle

Tabelle A-1: Baustein: Kollisionsprüfungen

Ebenen / Tabs	1
Name	Kollisionsprüfungen
Beschreibung	Darstellen von Ergebnissen durchgeföhrter Kollisionsprüfungen verschiedener Bauwerksmodelle
Datenquelle(n)	Koordinationsmodell, LC-Modell, weitere digitale Modelle
zeitl. variabel	ja
Technologien / Besonderheiten	Nach Bedarf Darstellung von 2D- oder 3D-Ansichten, webbasierter Modelviewer

Bauablauf

Tabelle A-2: Baustein: Animation Bauwerksherstellung

Ebenen / Tabs	1
Name	Animation des Bauablaufes
Beschreibung	Zeitabhängige Darstellung des Bauablaufs
Datenquelle(n)	Koordinationsmodell, LC-Modell, Terminpläne, Prozesse
zeitl. variabel	ja
Technologien / Besonderheiten	Nach Bedarf Darstellung von 2D- oder 3D-Ansichten in webbasiertem Modelviewer, Verknüpfung Bauwerksmodell mit Bauprozessen

Prozesse und Termine

Tabelle A-3: Baustein: Kanban Board

Ebenen / Tabs	1
Name	Kanban Board
Beschreibung	Virtuelles Kanban Board zur Strukturierung der Arbeitspakete
Datenquelle(n)	GADGET.DB, Kanban Board
zeitl. variabel	ja
Technologien / Besonderheiten	Webanwendung, verknüpft mit GADGET.DB

Projekt- und Baustelleninformationen

Tabelle A-4: Baustein: Live-Übertragung

Ebenen / Tabs	1
Name	AR-gestützte Live-Übertragung der Baustelle
Beschreibung	Live-Übertragungen der Baustelle durch Webcams, Drohnen mit Einblendung von bspw. Taktabschnitten, Status von Bau- teilen, Taktabschnitten, Flächen etc.
Datenquelle(n)	Bauwerksmodelle, Kameras (Webcam, Drohne), GADGET.DB
zeitl. variabel	ja
Technologien / Besonderheiten	AR-Brillen, Drohnen

Tabelle A-5: Baustein: Wetter

Ebenen / Tabs	1
Name	Wetter
Beschreibung	Anzeige des Wetters in einstellbarem Zeitraum
Datenquelle(n)	Dienstleister zur Abfrage von Wetter- und Klimadaten
zeitl. variabel	ja
Technologien / Besonderheiten	Nutzung von Webservices

Literaturverzeichnis

[Ackoff 1989] ACKOFF, R.L.: From Data to Wisdom. In: *Journal of Applied Systems Analysis* 16 (1989), S. 3–9

[Agarwal u. a. 2016] AGARWAL, Rajat ; CH, Shankar ; RASEKARAN ; SRIDHAR, Mukund: *Imagining Construction's Digital Future* | McKinsey & Company. <https://www.mckinsey.com/industries/capital-projects-and-infrastructure/our-insights/imagining-constructions-digital-future>, Juni 2016. – (Zugriff: 25.07.2018)

[Allplan 2017] ALLPLAN: *Hand in Hand: Wie BIM und Lean Management zusammenhängen*. <https://blog.allplan.com/de/bim-lean-management>, Januar 2017. – (Zugriff: 08.04.2019)

[André Borrmann u. a. 2018] ANDRÉ BORRMANN ; WERNER LANG ; PETZOLD, Frank ; VEREINIGUNG DER BAYERISCHEN WIRTSCHAFT E. V. (Hrsg.): *Digitales Planen Und Bauen - Schwerpunkt BIM*. Januar 2018

[Andreas Brandenberg 2017] ANDREAS BRANDENBERG: *Digitale Revolution: Was bedeutet das?* <https://ikm-hslu.ch/ikm-blog/2017/01/31/digitale-revolution-was-bedeutet-das/>, Januar 2017. – (Zugriff: 23.05.2019)

[Arayici u. a. 2011] ARAYICI, Y. ; COATES, P. ; KOSKELA, L. ; KAGIOGLOU, M. ; USHER, C. ; O'REILLY, K.: Technology Adoption in the BIM Implementation for Lean Architectural Practice. In: *Automation in Construction* 20 (2011), März, Nr. 2, S. 189–195. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2010.09.016>. – DOI 10.1016/j.autcon.2010.09.016. – ISSN 0926-5805

[Arbeitskreis Bauinformatik] ARBEITSKREIS BAUINFORMATIK: *German Association of Computing in Civil Engineering (GACCE) - BIM*. <http://www.gacce.de/bim.php>, o. J. – (Zugriff: 24.05.2019)

[van Ark u. de Jong 2004] ARK, Bart van ; JONG, Gjalt de: *Productiviteit in dienstverlening* Dl. 1, Dl. 1,. Assen : Koninklijke Van Gorcum, 2004. – ISBN 978-90-232-4084-6. – OCLC: 773708649

[Autodesk a] AUTODESK: *Autodesk Forge*. <https://forge.autodesk.com/>, o. J. – (Zugriff: 30.04.2019)

[Autodesk b] AUTODESK: *Code Blocks and DesignScript | The Dynamo Primer*. https://primer.dynamobim.org/en/07_Code-Block/7_Code-Blocks-and-Design-Script.html, o. J. – (Zugriff: 12.06.2019)

[Autodesk c] AUTODESK: *Construction Document Management Software | BIM 360 Docs*. <https://www.autodesk.com/bim-360/platform/construction-document-management-software/>, o. J. – (Zugriff: 13.05.2019)

[Autodesk d] AUTODESK: *Construction Management Software | Autodesk BIM 360*. <https://www.autodesk.com/bim-360/>, o. J. – (Zugriff: 30.04.2019)

[Autodesk e] AUTODESK: *Dynamo BIM*. <https://dynamobim.org/>, o. J. – (Zugriff: 10.05.2019)

[Autodesk f] AUTODESK: *Dynamo Primer*. <https://primer.dynamobim.org/de/index.html>, o. J. – (Zugriff: 10.05.2019)

[Autodesk g] AUTODESK: *Lean Construction Software | BIM 360 Plan*. <https://info.bim360.autodesk.com/bim-360-plan>, o. J. – (Zugriff: 04.10.2018)

[Autodesk h] AUTODESK: *Revit | BIM-Software | Autodesk*. <https://www.autodesk.de/products/revit/overview>, o. J. – (Zugriff: 10.05.2019)

[Autodesk i] AUTODESK: *Was Ist Visuelle Programmierung? | Dynamo Primer*. https://primer.dynamobim.org/de/01_Introduction/1-1_what_is_visual_programming.html, o. J. – (Zugriff: 24.05.2019)

[Ballard u. Howell 2015] BALLARD, Glenn ; HOWELL, Gregory: *Last Planner® System*. 2015

[Bär u. a. 2018a] BÄR, Christian (Hrsg.) ; GRÄDLER, Thomas (Hrsg.) ; MAYR, Robert (Hrsg.): *Digitalisierung im Spannungsfeld von Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Recht. 1. Band: Politik und Wirtschaft*. Bd. 1. Berlin : Springer Gabler, 2018. – ISBN 978-3-662-55720-4 978-3-662-55719-8. – OCLC: 1023576486

[Bär u. a. 2018b] BÄR, Christian (Hrsg.) ; GRÄDLER, Thomas (Hrsg.) ; MAYR, Robert (Hrsg.): *Digitalisierung im Spannungsfeld von Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Recht. 2. Band: Wissenschaft und Recht*. Bd. 2. Berlin, Germany : Springer Gabler, 2018. – ISBN 978-3-662-56438-7 978-3-662-56437-0. – OCLC: 1023576486

[Bär u. Purtschert 2014] BÄR, Reinhard ; PURTSCHERT, Phillip: *Lean-Reporting: Optimierung der Effizienz im Berichtswesen*. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2014. – ISBN 978-3-8348-1884-3 978-3-8348-2292-5. – OCLC: 867159920

[Bendel 2018] BENDEL, Oliver: *Definition: Digitalisierung*. <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/digitalisierung-54195>, Februar 2018. – (Zugriff: 23.05.2019)

[Berner u. a. 2016] BERNER, F. ; HERMES, M. ; SPIETH, D.: Wechselwirkungen Zwischen Lean Construction Und Der Arbeitsmethode BIM Am Beispiel Der BIM-Anwendungsfälle Visualisierung Und Bauablaufmodellierung. In: *Bauingenieur* 91 (2016), Nr. 11 - 2016, S. 466–472

[Berner u. a. 2015] BERNER, Fritz ; KOCHENDÖRFER, Bernd ; SCHACH, Rainer ; BERNER, Fritz: *Baubetriebsführung*. 2. Auflage. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2015 (Grundlagen der Baubetriebslehre Fritz Berner; Bernd Kochendörfer; Rainer Schach; 3[...]). – ISBN 978-3-658-09038-8 978-3-658-09037-1. – OCLC: 931867454

[BIMobject 2019] BIMOBJECT: *Startseite BIMobject*. <https://www.bimobject.com/de>, 2019. – (Zugriff: 04.04.2019)

[BIMsystems 2019] BIMSYSTEMS: *Bauteilmanagement-System von BIMsystems*. <https://www.bimsystems.de/bauteilmanagement-system>, 2019. – (Zugriff: 16.05.2019)

[Binnerger u. Wolfbeiß 2018a] BINNINGER, Marco ; WOLFBEISS, Oliver: Lean Berichtswesen in der Bauabwicklung. In: *Lean Construction – Das Managementhandbuch*. Springer Gabler, Berlin, Heidelberg, 2018. – ISBN 978-3-662-55336-7 978-3-662-55337-4, S. 219–227

[Binnerger u. Wolfbeiß 2018b] BINNINGER, Marco ; WOLFBEISS, Oliver: Taktplanung und Taktsteuerung bei weisenburger. In: *Lean Construction – Das Managementhandbuch*. Springer Gabler, Berlin, Heidelberg, 2018. – ISBN 978-3-662-55336-7 978-3-662-55337-4, S. 163–177

[BMVI 2015] BMVI, Bundesministerium für Verkehr und digitale I.: *Stufenplan Digitales Planen Und Bauen*. 2015

[BMWi 2014] BMWI, Bundesministerium für Wirtschaft und E.: *Digitale Agenda*. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Digitale-Welt/digitale-agenda.html>, 2014. – (Zugriff: 23.05.2019)

[Borrmann u. a. 2015] BORRMANN, André (Hrsg.) ; KÖNIG, Markus (Hrsg.) ; KOCH, Christian (Hrsg.) ; BEETZ, Jakob (Hrsg.): *Building Information Modeling*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-05606-3>. – ISBN 978-3-658-05605-6 978-3-658-05606-3

[Bredikhin 2018] BREDIKHIN, Ruslan: *RFID-Based Asset Tracking with Node.Js and MongoDB | Blog*. <https://www.spiria.com/en/blog/iot-m2m-embedded-solutions/>

rfid-based-asset-tracking-nodejs-and-mongodb/, Oktober 2018. – (Zugriff: 13.05.2019)

[buildingSMART International 2018] BUILDINGSMART INTERNATIONAL: *buildingSMART Data Dictionary Browser (bSDD)*. <http://bsdd.buildingsmart.org/>, August 2018. – (Zugriff: 26.05.2019)

[Bundesanstalt für Straßenwesen 2017] BUNDESANSTALT FÜR STRASSENWESEN: *Richtzeichnungen für Ingenieurbauten (RiZ-ING)*. https://www.bast.de/BAST_2017/DE/Ingenieurbau/Publikationen/Regelwerke/Entwurf/RIZ-ING.html, Februar 2017. – (Zugriff: 24.10.2018)

[Bundesregierung der Bundesrepublik Deutschland 2018] BUNDESREGIERUNG DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND: Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Daniel Föst, Frank Sitta, Grigorios Aggelidis, weiterer Abgeordneter und der Fraktion der FDP / Deutscher Bundestag. Köln, November 2018 (19/6028). – Drucksache. – 12 S. – ISSN 0722-8333

[Bundesvereinigung Bauwirtschaft 2019] BUNDESVEREINIGUNG BAUWIRTSCHAFT: *Branchenumsatz in 2019 erstmals über 350 Mrd. €*. <http://www.bv-bauwirtschaft.de/zdb-cms.nsf/id/branchenumsatz-in-2019-erstmals-ueber-350-mrd--bvb?open&ccm=030010>, März 2019. – (Zugriff: 02.04.2019)

[ceapoint aec technologies GmbH] CEAPPOINT AEC TECHNOLOGIES GMBH: *Regelbasierte Verknüpfung – CEAPPOINT GMBH*. <https://www.ceapoint.com/knowledgebase/regelbasierte-verknuepfung/>, o. J. – (Zugriff: 24.07.2019)

[Dave u. a. 2011] DAVE, Bhargav ; BODDY, S ; KOSKELA, Lauri: Visilean: Designing a Production Management System with Lean and BIM. In: *19th Annual Conference of the International Group for Lean Construction 2011, IGCL 2011* (2011), Januar, S. 477–487

[DB Station&Service AG & DB Netz AG 2018] DB STATION&SERVICE AG & DB NETZ AG: *BIM-Vorgaben - BIM-Methodik Digitales Planen und Bauen*. August 2018

[DeepL 2019] DEEPL: *DeepL Pro*. <https://www.deepl.com/pro.html>, Januar 2019. – (Zugriff: 22.01.2019)

[Destatis 2019a] DESTATIS, Statistisches Bundesamt D.: Auftragseingang Im Bauhauptgewerbe Im Dezember 2018: +13,2 % Saisonbereinigt Zum Vormonat / Statistisches Bundesamt Deutschland. Wiesbaden, April 2019. – Forschungsbericht

[Destatis 2019b] DESTATIS, Statistisches Bundesamt D.: Ausführliche Ergebnisse Zur Wirtschaftsleistung Im 4. Quartal 2018 / Statistisches Bundesamt Deutschland. Wiesbaden, April 2019. – Forschungsbericht

[Destatis 2019c] DESTATIS, Statistisches Bundesamt D.: *GENESIS-Online*. https://www-genesis.destatis.de/genesis/online;sid=91F21F60287B38AE043C7401400DF07A.GO_1_3?Menu=Willkommen, April 2019. – (Zugriff: 09.04.2019)

[Destatis 2019d] DESTATIS, Statistisches Bundesamt D.: Monatsbericht Im Bauhauptgewerbe / Statistisches Bundesamt Deutschland. Wiesbaden, April 2019 (Ergebnis - 44111-0009). – Monatsbericht

[DIN EN ISO 19650-1:2019-08] DIN EN ISO 19650-1:2019-08: DIN EN ISO 19650-1:2019-08, Organisation Und Digitalisierung von Informationen Zu Bauwerken Und Ingenieurleistungen, Einschließlich Bauwerksinformationsmodellierung_(BIM)_- Informationsmanagement Mit BIM_- Teil_1: Begriffe Und Grundsätze (ISO_19650-1:2018); Deutsche Fassung EN_ISO_19650-1:2018 / Beuth Verlag GmbH. <http://dx.doi.org/10.31030/3030494>. – Forschungsbericht

[DIN EN ISO 19650-2:2019-08] DIN EN ISO 19650-2:2019-08: DIN EN ISO 19650-2:2019-08, Organisation Und Digitalisierung von Informationen Zu Bauwerken Und Ingenieurleistungen, Einschließlich Bauwerksinformationsmodellierung_(BIM)_- Informationsmanagement Mit BIM_- Teil_2: Planungs-, Bau- Und Inbetriebnahmephase (ISO_19650-2:2018); Deutsche Fassung EN_ISO_19650-2:2018 / Beuth Verlag GmbH. <http://dx.doi.org/10.31030/3030497>. – Forschungsbericht

[DIN EN ISO 6385:2016 2016] DIN EN ISO 6385:2016: *DIN EN ISO 6385:2016, Grundsätze Der Ergonomie Für Die Gestaltung von Arbeitssystemen (ISO 6385:2016); Deutsche Fassung*. Februar 2016

[DIN SPEC 91391-1:2019-04 2019] DIN SPEC 91391-1:2019-04: *DIN SPEC 91391-1:2019-04 Gemeinsame Datenumgebungen (CDE) Für BIM-Projekte – Funktionen Und Offener Datenaustausch Zwischen Plattformen Unterschiedlicher Hersteller – Teil 1: Module Und Funktionen Einer Gemeinsamen Datenumgebung; Mit Digitalem Anhang*. April 2019

[DIN SPEC 91391-2:2019-04 2019] DIN SPEC 91391-2:2019-04: *DIN SPEC 91391-2:2019-04 Gemeinsame Datenumgebungen (CDE) Für BIM-Projekte – Funktionen Und Offener Datenaustausch Zwischen Plattformen Unterschiedlicher Hersteller - Teil 2: Offener Datenaustausch Mit Gemeinsamen Datenumgebungen*. April 2019

[Drenth 2001] DRENTH, Pieter J. D.: *Universität Heidelberg*. <https://web.archive.org/web/20121114112415/http://www.uni-heidelberg.de/presse/news/2112drent.html>, Dezember 2001. – (Zugriff: 23.05.2019)

[Duden] DUDEN: *Duden | Methodik | Rechtschreibung, Bedeutung, Definition, Herkunft*. <https://www.duden.de/rechtschreibung/Methodik>, o. J. – (Zugriff: 22.05.2019)

[Dürr 2018] DÜRR, Albert: *Digitalisierung ist mehr als BIM - und BIM ist mehr als Software.* <https://www.management-circle.de/blog/digitalisierung-ist-mehr-als-bim/>, Februar 2018. – (Zugriff: 08.04.2019)

[EANPC 2005] EANPC: Productivity - the high road to wealth / European Association of National Productivity Centres. Brüssel, Belgien, Dezember 2005. – Forschungsbericht. – 32 S. – <https://www.rkw-kompetenzzentrum.de/innovation/leitfaden/produktivitaet-der-schlüssel-zum-wohlstand/produktivitaet-wertschöpfung-und-messkonzept/die-beziehung-zwischen-produktivitaet-und-wertschöpfung/>

[Eastman u. a. 1974] EASTMAN, Charles M. ; DAVID FISHER ; GILLES LAFUE ; JOSEPH LIVIDINI ; DOUGLAS STOKER ; CHRISTOS YESSIOS: An Outline of the Building Description System / Carnegie-Mellon Univ., Pittsburgh, PA. Inst. of Physical Planning. Pittsburgh, PA, USA, September 1974 (Research Report No. 50). – Forschungsbericht. – 23 S.

[Egger u. Liebich 2013] EGGER, Hausknecht ; LIEBICH, Przybylo: BIM-Leitfaden für Deutschland. (2013), S. 109

[Endler 2019] ENDLER, Martin: *Nfc-Pcsc - Npm.* <https://www.npmjs.com/package/nfc-pcsc>, 2019. – (Zugriff: 13.05.2019)

[Ennemann 2014] ENNEMANN, Marc: *Survival of the Smartest 2.0.* Dezember 2014

[Evert Timberg 2018] EVERET TIMBERG: *Chart.Js | Open Source HTML5 Charts for Your Website.* 2018

[Feick 2016] FEICK, Hans-Werner: Die Digitale Revolution Gibt Es Nicht. (2016), September

[Fiedler 2018a] FIEDLER, Martin (Hrsg.): *Lean Construction - das Managementhandbuch: agile Methoden und Lean Management im Bauwesen.* Berlin, Germany : Springer Gabler, 2018. – ISBN 978-3-662-55337-4 978-3-662-55336-7

[Fiedler 2018b] FIEDLER, Martin: Lean Thinking – Eine Einführung. In: *Lean Construction – Das Managementhandbuch.* Springer Gabler, Berlin, Heidelberg, 2018. – ISBN 978-3-662-55336-7 978-3-662-55337-4, S. 13–37

[Fischer u. Schuetz 2017] FISCHER, Martin ; SCHUETZ, Maximilian: *Dynamically Extending Look-Ahead Windows with a Particular Focus on Value-Adding Activities | Center for Integrated Facility Engineering.* https://cife.stanford.edu/Seed2017_LookAheadWindows, 2017. – (Zugriff: 26.04.2019)

[Fosse u. a. 2017] FOSSE, Roar ; BALLARD, Glenn ; FISCHER, Martin: Virtual Design and Construction: Aligning BIM and Lean in Practice, 2017, S. 499–506

[Frandsen 2016] FRANDSON, Adam: *5 Steps to Takt Time Planning.* <https://leanconstructionblog.com/5-Steps-To-Takt-Time-Planning.html>, Januar 2016. – (Zugriff: 23.04.2019)

[Fuest 2019] FUEST, Clemens: *ifo Geschäftsklimaindex steigt.* <http://www.cesifo-group.de/de/ifoHome/facts/Survey-Results/Business-Climate/Geschaeftsklima-Archiv/2019/Geschaeftsklima-20190325.html>, März 2019. – (Zugriff: 03.04.2019)

[Gabler 2018] GABLER, Wirtschaftslexikon: *Definition: Wissen.* <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/wissen-47196>, Februar 2018. – (Zugriff: 23.05.2019)

[Gerber u. a. 2010] GERBER, David ; BECERIK-GERBER, Burcin ; KUNZ, Alex: *Building Information Modeling And Lean Construction: Technology, Methodology And Advances From Practice*, 2010

[Ghafari Associates 2018] GHAFARI ASSOCIATES: *vPlanner - the Visual Planning Solution for Lean Project Delivery.* <http://vplanner.app/>, 2018. – (Zugriff: 30.04.2019)

[Gidei 2019] GIDEI, Radu: *DynaWeb Is a Dynamo Package Providing Support for Interaction with the Interwebz in General and with REST APIs in Particular.: Radumg/DynaWeb.* April 2019

[Girmscheid 2014] GIRMSCHEID, Gerhard: *Bauunternehmensmanagement-prozessorientiert Band 1.* Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2014. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-55152-9>. – ISBN 978-3-642-55151-2 978-3-642-55152-9

[Girmscheid u. Motzko 2013] GIRMSCHEID, Gerhard ; MOTZKO, Christoph: *Kalkulation, Preisbildung und Controlling in der Bauwirtschaft: produktionsprozessorientierte Kostenberechnung und Kostensteuerung.* 2. Aufl. Berlin : Springer Vieweg, 2013. – ISBN 978-3-642-36636-9 978-3-642-36637-6. – OCLC: 852495554

[Google Code 2019] GOOGLE CODE: *Google Code Archive - Long-Term Storage for Google Code Project Hosting.* <https://code.google.com/archive/p/trimpath/wikis/SinglePageApplications.wiki>, 2019. – (Zugriff: 15.05.2019)

[Google LLC 2019] GOOGLE LLC: *Angular Material.* <https://material.angular.io/>, 2019. – (Zugriff: 15.05.2019)

[Goschy u. Kurz] GOSCHY, Wilhelm ; KURZ, Kathrin: *25 Jahre Lean Management / Technische Universität Darmstadt, Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen.* – Forschungsbericht. – Herausgeber: Staufen AG

[Grund 2018] GRUND, Christopher: *Untersuchung von Lean Construction Prinzipien und den Möglichkeiten zur Digitalisierung der dazugehörigen Instrumente*. Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen, Technische Universität Darmstadt, 2018 (unveröffentlichte Abschlussarbeit)

[Grzanna 2018] GRZANNA, Marcel: Alles schon digital? In: *sueddeutsche.de* (2018). – ISSN 0174-4917

[Gurevich u. Sacks 2014] GUREVICH, Ury ; SACKS, Rafael: Examination of the Effects of a KanBIM Production Control System on Subcontractors' Task Selections in Interior Works. In: *Automation in Construction* 37 (2014), Januar, S. 81–87. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.003>. – DOI 10.1016/j.autcon.2013.10.003. – ISSN 09265805

[Haun 2002] HAUN, Matthias: *Handbuch Wissensmanagement Grundlagen und Umsetzung, Systeme und Praxisbeispiele*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2002. – ISBN 978-3-662-11986-0. – OCLC: 863947983

[Hines 2019] HINES, Brandon: *React Native Module for iOS and Android Biometrics: SelfLender/React-Native-Biometrics*. Self Lender, Mai 2019

[Hübner 2019] HÜBNER, Peter: Positionspapier Baukonjunkturelle Lage: Wachstum 2019 Weiter Auf Hohem Niveau / Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V. 2019. – Forschungsbericht

[Hübner u. Müller 2018] HÜBNER, Peter ; MÜLLER, Tim-Oliver: *Bauen Statt Streiten. Partnerschaftsmodelle Am Bau - Kooperativ, Effizient, Digital*. Juni 2018

[InfoWorld 1984] INFOWORLD: One Company's CAD Success Story. 6 (1984), Dezember, Nr. 49, S. 88. – ISSN 0199-6649

[Institut für Zeitwirtschaft und Betriebsberatung Bau] INSTITUT FÜR ZEITWIRTSCHAFT UND BETRIEBSBERATUNG BAU: *Zeitaufnahmen*. http://www.zeittechnik-verlag.de/inhalt.php?id=7757&menu_level=2&id_mnu=10108&id_kunden=1015, o. J. – (Zugriff: 04.04.2019)

[ISO/IEC 19505-1:2012(E) 2012] ISO/IEC 19505-1:2012(E): *Information technology - Object Management Group Unified Modeling Language (OMG UML), Infrastructure*. April 2012

[Khanzode u. a. 2006] KHANZODE, Atul ; FISCHER, Martin ; REED, Dean ; BALLARD, Glenn: A Guide to Applying the Principles of Virtual Design & Construction (VDC) to the Lean Project Delivery Process. (2006), Dezember

[Klanitz] KLANITZ, Torsten: *Lean Management*. <https://refa.de/service/refalexikon/lean-management>, o. J. – (Zugriff: 28.05.2019)

[Koskela 1992] KOSKELA, Lauri: *Application of the New Production Philosophy to Construction*. Bd. 72. Stanford university Stanford, 1992

[Kröger 2018] KRÖGER, Samy ; DIN, Deutsches Institut für N. (Hrsg.): *BIM Und Lean Construction - Synergien Zweier Arbeitsmethodiken*. 1. Beuth Verlag GmbH, 2018

[LearnBoost 2019] LEARNBOOST: *Mongoose ODM v5.5.8*. <https://mongoosejs.com/>, 2019. – (Zugriff: 15.05.2019)

[Leifgen 2018] LEIFGEN, Christian: Digitale Taktsteuerungstafel Zur Unterstützung Einer Lean Construction-Basierten Und Digitalen Arbeitsweise. In: *Forum Bauinformatik 2018* Tagungsband 30. Forum Bauinformatik (2018), Nr. 30, S. 424. <http://dx.doi.org/10.25643/bauhaus-universitaet> – DOI 10.25643/bauhaus–universitaet

[Leifgen u. Kujajewski 2018] LEIFGEN, Christian ; KUJAJEWSKI, Steffen: Integrated Digital and Model-Based Construction Logistics Management Based on Lean Thinking Approaches. In: *Proceedings of the 35th ISARC*. Berlin, Germany, Juli 2018

[Lesh 2019] LESH, Ben: *RxJS*. <https://rxjs.dev/>, 2019. – (Zugriff: 14.05.2019)

[Liebsch u. Sautter 2018] LIEBSCH, Peter ; SAUTTER, Hanspeter: *BAP BIM-Projektabwicklungsplan - Ein Dokument Des BIM-Praxisleitfadens*. Juli 2018

[Lin u. Golparvar-Fard 2018] LIN, Jacob J. ; GOLPARVAR-FARD, Mani: Visual Data and Predictive Analytics for Proactive Project Controls on Construction Sites. In: SMITH, Ian F. C. (Hrsg.) ; DOMER, Bernd (Hrsg.): *Advanced Computing Strategies for Engineering*, Springer International Publishing, 2018. – ISBN 978–3–319–91635–4, S. 412–430

[Lunze 2010] LUNZE, Jan: *Künstliche Intelligenz für Ingenieure*. 2., völlig überarbeitete Auflage. München : Oldenbourg, 2010. – ISBN 978–3–486–70222–4. – OCLC: 670418060

[MongoDB 2019] MONGODB: *The Most Popular Database for Modern Apps*. <https://www.mongodb.com/>, 2019. – (Zugriff: 15.05.2019)

[Moring u. a. 2018] MORING, Andreas ; MAIWALD, Lukas ; KEWITZ, Timo: Bits and Bricks: Digitalisierung von Geschäftsmodellen in Der Immobilienbranche. (2018). ISBN 9783658193874

[Mozilla and individual contributors 2019] MOZILLA AND INDIVIDUAL CONTRIBUTORS: *Web Speech API*. https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/Web_Speech_API, 2019. – (Zugriff: 13.05.2019)

[Müller 2018] MÜLLER, Hans-Erich: *Definition: Digitale Technologien*. <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/digitale-technologien-54127>, Februar 2018. – (Zugriff: 23.05.2019)

[Nathan Miller 2019] NATHAN MILLER: *Archinate / Slingshot — Bitbucket*. <https://bitbucket.org/archinate/slingshot/src/master/>, 2019. – (Zugriff: 10.05.2019)

[Nemetschek] NEMETSCHEK: *Historie*. <https://www.nemetschek.com/unternehmen/historie/>, o. J. – (Zugriff: 05.04.2019)

[Nesensohn u. Fiedler 2018] NESENSOHN, Claus ; FIEDLER, Martin: *Lean Culture – Der Schlüssel zum Erfolg*. In: *Lean Construction – Das Managementhandbuch*. Springer Gabler, Berlin, Heidelberg, 2018. – ISBN 978–3–662–55336–7 978–3–662–55337–4, S. 65–78

[Niederdrenk u. Seemann 2018] NIEDERDRENK, Ralph ; SEEMANN, Ralph: *Wachstum 2020 – Digitalisierung und BIM*. (2018), März

[Ōno u. a. 2013] ŌNO, Taiichi ; HOF, Wilfried ; STOTKO, Eberhard C. ; ROTHER, Mike: *Das Toyota-Produktionssystem: das Standardwerk zur Lean Production*. 3., erw. und aktualisierte Aufl. Frankfurt New York : Campus Verlag, 2013 (Produktion). – ISBN 978–3–593–39929–4. – OCLC: 851074961

[Oprach u. a. 2018] OPRACH, Svenja ; STEUER, Dominik ; BINNINGER, Marco ; DLOUHY, Janosch ; FIEDLER, Martin (Hrsg.): *Die Wahl der richtigen Visualisierung für Baustellenabläufe*. Bd. *Lean Construction - Das Managementhandbuch: Agile Methoden und Lean Management im Bauwesen*. Berlin, Germany : Springer Gabler, 2018. – ISBN 978–3–662–55336–7 978–3–662–55337–4

[Oskouie u. a. 2012] OSKOUIE, Pedram ; GERBER, David ; ALVES, Thais ; BECERIK-GERBER, Burcin: *Extending the Interaction of Building Information Modeling and Lean Construction*, 2012 (IGLC 2012 - 20th Conference of the International Group for Lean Construction)

[Oswald u. Krcmar 2018] OSWALD, Gerhard (Hrsg.) ; KRCMAR, Helmut (Hrsg.): *Digitale Transformation: Fallbeispiele und Branchenanalysen*. [1. Auflage] 2018. Wiesbaden, Germany : Springer Gabler, 2018 (Informationsmanagement und digitale Transformation). – ISBN 978–3–658–22624–4 978–3–658–22623–7. – OCLC: 1041634750

[Rambach 2019] RAMBACH, Markus ; ARBEITSGRUPPE HOCHBAU IM ARBEITSKREIS DIGITALISIERTES BAUEN IM HAUPTVERBAND DER DEUTSCHEN BAUINDUSTRIE E.V. (Hrsg.): *BIM Im Hochbau*. Mai 2019

[REFA-Consulting AG a] REFA-CONSULTING AG: *Arbeitsmethode Definition*. <https://refa-consulting.de/arbeitsmethode>, o. J. – (Zugriff: 22.05.2019)

[REFA-Consulting AG b] REFA-CONSULTING AG: *Definition Arbeitssystem*. <https://refa-consulting.de/arbeitssystem>, o. J. – (Zugriff: 04.04.2019)

[REFA-Consulting AG c] REFA-CONSULTING AG: *Definition Arbeitsweise*. <https://refa-consulting.de/arbeitsweise>, o. J. – (Zugriff: 22.05.2019)

[REFA-Consulting AG d] REFA-CONSULTING AG: *Definition Produktivität*. <https://refa-consulting.de/produktivitaet>, o. J. – (Zugriff: 08.04.2019)

[Reinmann-Rothmeier u. Mandl 2000] REINMANN-ROTHMEIER, Gabi ; MANDL, Heinz: *Wissen*. <https://www.spektrum.de/lexikon/psychologie/wissen/16892>, 2000. – (Zugriff: 23.05.2019)

[Reisig 2010] REISIG, Wolfgang: *Petrinetze: Modellierungstechnik, Analysemethoden, Fallstudien*. 1. Aufl. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2010 (Leitfäden der Informatik). – ISBN 978-3-8348-1290-2. – OCLC: 660151425

[Rodrigues u. a. 2018] RODRIGUES, Eduardo ; MOL, Mario ; CARDOSO, Ricardo: *jsGantt Improved*. 2018

[Rowley 2007] ROWLEY, Jennifer: The Wisdom Hierarchy: Representations of the DIKW Hierarchy. In: *Journal of Information Science* 33 (2007), April, Nr. 2, S. 163–180. <http://dx.doi.org/10.1177/0165551506070706>. – DOI 10.1177/0165551506070706. – ISSN 0165-5515, 1741-6485

[Sacks u. a. 2013] SACKS, Rafael ; BARAK, Ronen ; BELACIANO, Biniamin ; GUREVICH, Ury ; PIKAS, Ergo: KanBIM Workflow Management System: Prototype Implementation and Field Testing. In: *Lean Construction Journal* 2013 (2013), April, S. 19–35. – ISSN 1555-1369

[Sacks u. a. 2018] SACKS, Rafael ; KORB, Samuel ; BARAK, Ronen ; GEVA, Gil: *Building Lean, Building BIM: Improving Construction the Tidhar Way*. London ; New York : Routledge Taylor & Francis Group, 2018. – ISBN 978-1-138-23722-3 978-1-138-23723-0

[Sacks u. a. 2010] SACKS, Rafael ; KOSKELA, Lauri ; DAVE, Bhargav A. ; OWEN, Robert: Interaction of Lean and Building Information Modeling in Construction. In: *Journal of Construction Engineering and Management* 136 (2010), September, Nr. 9, S. 968–980. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000203](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000203). – DOI 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000203. – ISSN 0733-9364, 1943-7862

[Saieg u. a. 2018] SAIEG, Pedro ; SOTELINO, Elisa D. ; NASCIMENTO, Daniel ; CAIADO, Rodrigo Goyannes G.: Interactions of Building Information Modeling, Lean and Sustainability on the Architectural, Engineering and Construction Industry: A Systematic Review. In: *Journal of Cleaner Production* 174 (2018), Februar, S. 788–806. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.030>. – DOI 10.1016/j.jclepro.2017.11.030. – ISSN 0959-6526

[Schiffer 1998] SCHIFFER, Stefan: *Visuelle Programmierung: Grundlagen und Einsatzmöglichkeiten*. Bonn : Addison-Wesley, 1998. – ISBN 978-3-8273-1271-6. – OCLC: 610905932

[Schüler 2011] SCHÜLER, Hans-Peter: *Digitaler Stift wandelt Notizen in PDF-Dateien*. <https://www.heise.de/newsticker/meldung/Digitaler-Stift-wandelt-Notizen-in-PDF-Dateien-1247848.html>, Mai 2011. – (Zugriff: 25.04.2019)

[Sibelius Seraphini u. a. 2019] SIBELIUS SERAPHINI ; ZACK STORY ; NICK POMFRET: *A Camera Component for React Native. Also Supports Barcode Scanning!*: React-Native-Community/React-Native-Camera. React Native Community, Mai 2019

[Sommer 2016] SOMMER, Hans: *Projektmanagement im Hochbau: mit BIM und Lean Management*. 4. Auflage. Berlin Heidelberg : Springer Vieweg, 2016. – ISBN 978-3-662-48923-9 978-3-662-48924-6. – OCLC: 932681751

[Statistisches Bundesamt 2008] STATISTISCHES BUNDESAMT: *Klassifikation der Wirtschaftszweige - Mit Erläuterungen* / Statistisches Bundesamt. Wiesbaden, Dezember 2008. – Forschungsbericht

[Stern u. a. 2018] STERN, Sebastian ; STRUBE, Gernot ; LOTZ, Carsten ; KUTZ, André ; HEIN, Philipp ; PETHÖ-SCHRAMM, Anneke M. ; BERGMANN, Daniel: *Infrastruktur & Wohnen - Deutsche Ausbauziele in Gefahr*. Februar 2018

[Till Alexander Leopold u. a. 2018] TILL ALEXANDER LEOPOLD ; VESSELINA STEFANOVA RATCHEVA ; SAADIA ZAHIDI: *The Future of Jobs Report 2018*. World Economic Forum, 2018

[Torka 2018] TORKA, Patrick: *Deutsche Bauindustrie Boomt Weiter – Und Droht Den Digitalen Anschluss Zu Verpassen*. <https://www.pwc.de/de/pressemitteilungen/2018/deutsche-bauindustrie-boomt-weiter-und-droht-den-digitalen-anschluss-zu-verpassen.html>, März 2018. – (Zugriff: 03.04.2019)

[Toyota Industries Corporation] TOYOTA INDUSTRIES CORPORATION: *The Story of Sakichi Toyoda | Toyota Industries Corporation*. https://www.toyota-industries.com/company/history/toyoda_sakichi/, o. J. – (Zugriff: 02.07.2019)

[van Treeck 2016] TREECK, C. van: Building Information Modeling. In: *Gebäude.Technik.Digital*. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2016 (VDI-Buch). – ISBN 978-3-662-52824-2 978-3-662-52825-9, S. 7–90

[van Nederveen u. Tolman 1992] VAN NEDERVEEN, G.A. ; TOLMAN, F.P.: Modelling Multiple Views on Buildings. In: *Automation in Construction* 1 (1992), Dezember, Nr. 3, S. 215–224. [http://dx.doi.org/10.1016/0926-5805\(92\)90014-B](http://dx.doi.org/10.1016/0926-5805(92)90014-B). – DOI 10.1016/0926-5805(92)90014-B. – ISSN 09265805

[Verein Deutscher Ingenieure 2012] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI-Richtlinien VDI 2870 Ganzheitliche Produktionssysteme*. Juli 2012

[Verein deutscher Ingenieure 2018a] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI-Richtlinien VDI 2552 Blatt 2 Building Information Modeling - Begriffe (Entwurf)*. Juni 2018

[Verein deutscher Ingenieure 2018b] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI-Richtlinien VDI 2552 Blatt 4 Building Information Modeling - Anforderungen an den Datenaustausch*. Oktober 2018

[Verein deutscher Ingenieure 2018c] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI-Richtlinien VDI 2552 Blatt 5 Building Information Modeling - Datenmanagement*. Dezember 2018

[Verein deutscher Ingenieure 2019] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI-Richtlinien VDI 2553 Lean Construction*. März 2019

[VisiLEAN] VisiLEAN: *VisiLEAN - An Integrated Lean Building Information Model*. <http://visilean.com/>, o. J. – (Zugriff: 09.04.2019)

[von Heyl u. Teizer 2017] von HEYL, Jakob ; TEIZER, Jochen: *Lean Production Controlling and Tracking Using Digital Methods*, 2017, S. 127–134

[Wagner 2017] WAGNER, Gernot: *BIM in Der Praktischen Umsetzung*. <https://www.fh-kufstein.ac.at/content/download/3535337/file/Vortrag%20BiM-10-11-2017%20FH-Kufstein-handout.pdf>, November 2017. – (Zugriff: 22.08.2018)

[Weik 2019] WEIK, Maximilian: *Lean Construction Software - Digitale Prozessplanung*. <https://place-strategy.de/lean-digitalisieren/lean-construction-software>, 2019. – (Zugriff: 29.04.2019)

[Weizsäcker 2018] WEIZSÄCKER, Robert K.: *Definition: Arbeitsproduktivität*. <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/arbeitsproduktivitaet-30245>, Februar 2018. – (Zugriff: 08.04.2019)

[Wikipedia contributors 2019] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS: *Visual Programming Language*. In: *Wikipedia* (2019), Mai. – Page Version ID: 897813954

[Winkeljohann u. a. 2014] WINKELJOHANN, Norbert ; HÖHN, Alfred ; BRÄUNINGER, Michael ; SCHLITTE, Friso ; BIESSENECKER, Stefan ; LAGEMANN, Andreas: *Deutschland 2030 - Die Arbeitsplätze Der Zukunft*. 2014. – Forschungsbericht

[Womack u. a. 1990] WOMACK, James P. ; JONES, Daniel T. ; Roos, Daniel: *The Machine That Changed the World*. (1990). ISBN 0892563508

[Xie 2019] XIE, Ziyu: *Angular2DraggableDemo*. <https://xieziyu.github.io/angular2-draggable/#/home>, Mai 2019. – (Zugriff: 14.05.2019)

[ZEIT ONLINE 2019] ZEIT ONLINE, jkl: *Bauunternehmen erzielen Auftragsrekord*. <https://www.zeit.de/wirtschaft/2019-02/bauindustrie-baubranche-2018->

aufträge-boom-immobilien-grossstaedte, Februar 2019. – (Zugriff: 01.03.2019)

[Zentralverband des Deutschen Baugewerbes e.V. 2013] ZENTRALVERBAND DES DEUTSCHEN BAUGEWERBES e.V. (Hrsg.): *Arbeitszeit-Richtwerte Tabelle Hochbau*. Neu-Isenburg : Zeittechnik-Verlag GmbH, 2013. – ISBN 978-3-939216-15-5

[Živadinović 2019] ŽIVADINović, Dušan: *Die Technik hinter 5G: So funktioniert das neue Funknetz*. <https://www.heise.de/newsticker/meldung/Die-Technik-hinter-5G-So-funktioniert-das-neue-Funknetz-4355865.html>, April 2019. – (Zugriff: 19.07.2019)