

**Ein Beitrag zur Prozessautomatisierung
im Bauprojekt-Controlling**

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

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

**Dissertation
von M. Sc. Christopher Kosel**

Erstreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko
Korreferent: Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Christian Hofstadler

Darmstadt 2022

Kosel, Christopher:

Ein Beitrag zur Prozessautomatisierung im Bauprojekt-Controlling

Darmstadt, Technische Universität Darmstadt

Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUprints: 2023

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-229950

Tag der mündlichen Prüfung: 06. Dezember 2022

Veröffentlicht unter CC BY-NC 4.0 international

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

Erstreferent:

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

Institut für Baubetrieb

Technische Universität Darmstadt

Korreferent:

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

Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft

Technische Universität Graz

Vorwort des Erstreferenten

Trotz der fortschreitenden Mechanisierung und Automatisierung in der Bauwirtschaft ist die Verbesserung der Produktivität in Relation zu anderen Industriezweigen nicht ausreichend. In den Arbeitssystemen des Bauwesens bildet der Mensch ein wesentliches und bezogen auf deren Leistungsfähigkeit durchaus limitierendes Element. Insofern ist der Mensch bei der Gestaltung von Arbeitssystemen im Kontext der Steigerung der Effektivität und Effizienz als eine der zentralen Größen, neben der Ertüchtigung der Betriebsmittel, zu betrachten und die Potenziale zur Verbesserung seiner Leistung sind zu erschließen. Eine weitere wichtige Einflussgröße in der Evolution des Bauwesens der Gegenwart bildet die digitale Transformation. Der Zusammenschluss der Mechanisierung und Automatisierung mit der digitalen Transformation wird dann Mehrwerte generieren, wenn die Ergonomie der neu kreierten Gebilde von Arbeitsmethoden und Arbeitssystemen den Menschen darin fördert und nicht überfordert. Das betrifft sowohl die Produktionsprozesse direkt auf der Baustelle als auch die Kern- und Supportprozesse in der Bauprojektadministration. Diesen Ansatz nimmt Herr Christopher Kosel M.Sc. für seine Forschungsarbeit auf, deren Ergebnisse mit der vorliegenden Dissertationsschrift „Ein Beitrag zur Prozessautomatisierung im Bauprojekt-Controlling“ dokumentiert sind.

Der Verfasser grenzt zunächst die Begriffe der Digitalisierung und der digitalen Transformation ab, was substantiell für das Verständnis darüber ist, wie künftig Prozesse in den Strukturen von Cyber-physischen Systemen respektive im Internet of Things zu gestalten sind. Bezogen auf das Bauwesen konstatiert der Verfasser zutreffend, dass der Mensch als primäre ausführende Kraft das zentrale Bindeglied in der sozio-ökonomisch-technischen Prozessstruktur bildet und die Prozessgeschwindigkeit überwiegend vorgibt. Herr Kosel identifiziert mit wissenschaftlichen Methoden die daraus resultierenden Probleme der Praxis mit Bezug zum Bauprojekt-Controlling und leitet daraus die Kernpunkte einer kontinuierlichen Verbesserung durch den Einsatz digitaler Methoden im Sinne der Industrie 4.0 ab. Er nimmt dafür den Grundgedanken der Methode der Digital Twin Construction auf und präzisiert diesen bezogen auf die Abgrenzung zwischen dem Building Information Modeling (BIM), dem Digitalen Modell, dem Digitalen Schatten und dem Digitalen Zwilling. Herr Kosel statuiert ein Prozessmodell für einen Steuer- und Regelkreis im Bauprojekt-Controlling mit Störgrößenaufschaltung und zeigt den Weg dessen Implementierung in einem Bauunternehmen auf. Die Viabilität des Prozessmodells wird eindrucksvoll mit einem Realisierbarkeitstest belegt. Der Verfasser beschreibt detailliert die Ergebnisse des Realisierbarkeitstests für zuvor definierte Prüfprozesse, aus denen der Grad der Automatisierung abgeleitet werden kann. Der Automatisierungsgrad für den jeweiligen Prüfprozess wird ermittelt.

Mit der vorliegenden Arbeit leistet Herr Christopher Kosel M.Sc. einen relevanten Beitrag zur digitalen Transformation im Bauwesen. Herr Kosel entwickelt auf theoretischer Basis eine für die Baupraxis anwendbare Methode der Digital Twin Construction für den Ingenieurbau mit dem Schwerpunkt im Bauprojekt-Controlling. Neuartig in Bezug auf die Modellierung und auf die Komposition von Softwarekomponenten ist der Realisierbarkeitstest, mit dessen Hilfe im Rahmen von konkreten Bauprojekten die tatsächlich in den unterschiedlichen Prozessrelationen zwischen Planung und Bauausführung erzielten Automatisierungsgrade quantifiziert werden konnten. Es ist gelungen, bisher manuell durchgeführte Prozesskonglomerate zu integrieren, sie

zumindest teilweise zu automatisieren, die Datenkonsistenz zu steigern und die Prozessdauern zu reduzieren. Damit wurde auch die günstige Ergonomie der entwickelten Strukturen belegt. Die automatisierte respektive teilautomatisierte Bereitstellung von Daten und Informationen zum Leistungsstand auf der Baustelle und deren Interpretation und Validierung bilden die Basis für die Echtzeit-Steuerung in Bauprojekten. Insofern ist mit der vorliegenden Dissertationsschrift ein neuer wichtiger Baustein der Forschungsarbeit am Institut für Baubetrieb der TU Darmstadt kreiert worden.

Ich danke dem Verfasser für diese Leistung.

Darmstadt, im Dezember 2022

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

Danksagung des Verfassers

Lediglich durch die Unterstützung vieler Personen ist es möglich, die Kombination aus Praxis und Forschung in vorliegendem Maße zu bewältigen. Diese praxisnahe Dissertation entstand während meiner Tätigkeit im Bereich der digitalen Transformation bei der Implenia Construction GmbH und der Beschäftigung als externer wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Baubetrieb der Technischen Universität Darmstadt.

Mein außerordentlicher Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko für die freundliche Aufnahme am Institut für Baubetrieb, für die stetige Förderung und Forderung im Rahmen meiner Dissertation sowie die stets sehr gute wissenschaftliche Betreuung. Darüber hinaus hat er mir ermöglicht, an Richtlinienausschüssen und Forschungsprojekten mitzuwirken und Fachbeiträge zu verfassen. Das hat maßgeblich dazu beigetragen, mich persönlich weiterzuentwickeln.

Ebenso danke ich Herrn Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christian Hofstadler für die Übernahme des Korreferats und die wertvollen Impulse bei der Erstellung meiner Dissertation.

Ein besonderer Dank gilt meinen Kolleginnen und Kollegen bei der Implenia Construction GmbH. Ich habe es als höchste Wertschätzung empfunden, dass sie sich auch während intensiver Projektarbeit Freiraum zu meiner Unterstützung geschaffen haben.

Bei allen Kolleginnen und Kollegen am Institut für Baubetrieb bedanke ich mich für die angenehme und konstruktive Zusammenarbeit. Als extern Promovierender habe ich mich stets als Teil des Instituts gefühlt. Besonders möchte ich mich an dieser Stelle bei Dr.-Ing. Jörg Fenner für seine immer offene Tür und den fachlichen Austausch bedanken.

Von Herzen danke ich meiner Familie für die bedingungslose Unterstützung. Meinen Eltern danke ich für das Lektorat meiner Arbeit und für die wertvollen Diskussionen. Meiner Schwester danke ich für den spannenden Austausch über die Themengebiete der Arbeit aus einem gänzlich anderen Blickwinkel. Ein ganz besonderer Dank gilt meiner Frau Katharina, die mich bei der Anfertigung der Arbeit unterstützt, mir Verständnis für unzählige Arbeitsstunden entgegengebracht und mir zu jeder Zeit Rückhalt gegeben hat. Ohne Dich hätte diese Arbeit nicht entstehen können.

Bischofsheim, im Dezember 2022

Christopher Kosel

The electric light did not come from the continuous improvement of candles.

– Oren Harari –

Inhaltsverzeichnis

Vorwort des Erstreferenten	III
Danksagung des Verfassers	V
Inhaltsverzeichnis	IX
Abbildungsverzeichnis	XII
Abkürzungsverzeichnis	XV
Tabellenverzeichnis	XVII
1.Einleitung	1
1.1. Ausgangssituation und Problemstellung	2
1.2. Zielsetzung	7
1.3. Aufbau der Arbeit	8
1.4. Forschungsmethodik der Arbeit	11
1.5. Eingrenzung und Annahmen	15
2.Forschungsbezugsrahmen und terminologische Grundlage	17
2.1. Inhaltliche Verortung der Fachdisziplin Baubetrieb	18
2.2. Verortung innerhalb der Forschungsarbeit am Institut für Baubetrieb	20
2.3. Problemstellungen der Praxis	22
2.3.1. Unternehmensinterne empirische Untersuchung	22
2.3.2. Unternehmensübergreifende empirische Untersuchung	30
2.4. Erkenntnisgewinn	33
3.Controlling als zentrales Managementsystem	35
3.1. Herleitung aus dem Themenkomplex der Kybernetik	35
3.1.1. Prozesse	38
3.1.2. Steuerung und Regelung in Systemen	39
3.2. Grundlagen des Bauprojekt-Controllings	42
3.2.1. Mehrebenensteuerung bei Bauprojekten	43
3.2.2. Kernaufgaben des Bauprojekt-Controllings	46
3.2.3. Durchführungs- und Dispositionssteuerung	50

4.Technischer und sozio-technischer Bezugsrahmen	52
4.1. Industrie 4.0	53
4.2. Technologien	57
4.2.1. Interaktion	58
4.2.2. Interpretation	67
4.3. Digitale Abbilder	70
4.3.1. Building Information Modeling	71
4.3.2. Digitaler Schatten und Digitaler Zwilling	73
4.4. Digital Twin Construction	79
4.5. Forschungslücke	85
5.Integration Digitaler Abbilder in das Bauprojekt-Controlling	86
5.1. Methodenausrichtung	87
5.2. Digitale Abbilder innerhalb der Digital Twin Construction	89
5.2.1. Das Paradigma Digitale Abbilder	89
5.2.2. Einbindung innerhalb von Cloud-Systemen	91
5.2.3. Mehrwerte und Risiken	92
5.3. Unternehmensbezogene Einführung	95
5.4. Bauprojekt-Controlling auf Basis der Digital Twin Construction	104
5.4.1. Prozessebene	104
5.4.2. Zeitliche Ebene	107
5.4.3. Steuer- und Regelkreis im Bauprojekt-Controlling	112
5.4.4. Entscheidungen in Steuer- und Regelkreisen	116
6.Anwendung auf das Bauunternehmen	119
6.1. Abgrenzung des Realisierbarkeitstests auf Basis der empirischen Untersuchung	120
6.2. Der aktuelle Stand der Technik	125
6.3. Prüfziele	129
6.4. Prüfobjekte, Prüfmerkmale und Prüfmotrik	130
6.5. Durchführung des Realisierbarkeitstest	132
6.5.1. Fallstudie	132
6.5.2. Übersicht	133

Inhaltsverzeichnis	XI
6.5.3. Durchführung	136
6.6. Bewertung	172
7.Resümee	175
7.1. Zusammenfassung und Fazit	176
7.2. Ausblick	182
Literaturverzeichnis	184
Anhang	192

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Arbeitsproduktivität im Baugewerbe _____	2
Abbildung 1-2: Evolutionäre und disruptive Innovationen anhand der Anforderungskurven _	5
Abbildung 1-3: Aufbau der Arbeit _____	9
Abbildung 1-4: Ablauf der Forschungsmethode _____	12
Abbildung 2-1: Beispiel der Prozesslandkarte einer Bauorganisation _____	18
Abbildung 2-2: Inhaltsanalytischer Ablauf _____	24
Abbildung 2-3: Zusammenfassende Inhaltsanalyse mit induktiver Kategorienbildung _____	28
Abbildung 3-1: Systemisches und kybernetisches Denken in zirkulärer Darstellung _____	36
Abbildung 3-2: Wirkungsplan mit typischen Elementen eines elementaren Steuerungssystems _____	40
Abbildung 3-3: Wirkungsplan mit typischen Elementen eines elementaren Regelungssystems _____	40
Abbildung 3-4: Struktureller Aufbau einer Mehrebenensteuerung für Bauprojekte _____	44
Abbildung 3-5: Kernaufgaben des Bauprojekt-Controllings _____	46
Abbildung 3-6: Phasen des Bauprojekt-Controllings _____	49
Abbildung 3-7: Steuerungsrichtungen des Bauprojekt-Controllings _____	50
Abbildung 4-1: Die vier Stufen der industriellen Revolution _____	53
Abbildung 4-2: Die Taylor-Wanne _____	54
Abbildung 4-3: Bausteine der Industrie 4.0 _____	57
Abbildung 4-4: Elemente eines Cyber-Physischen Systems _____	58
Abbildung 4-5: Zeitliche Einordnung des Digitalen Schattens _____	60
Abbildung 4-6: Die Digitalisierung der Produktion und IT-Technologie im Zeitverlauf _____	64
Abbildung 4-7: Auflösung der Automatisierungspyramide _____	68
Abbildung 4-8: Datenaustausch innerhalb eines Digitalen Modells _____	75
Abbildung 4-9: Datenaustausch innerhalb eines Digitalen Schattens _____	76
Abbildung 4-10: Datenänderung innerhalb eines Digitalen Zwillings _____	76
Abbildung 4-11: Das Digitaler Zwillings-Paradigma _____	77
Abbildung 4-12: DTC workflow process _____	81
Abbildung 4-13: Die dreistufige Evolution des Construction Digital Twin _____	83

Abbildung 5-1: Bausteine der Industrie 4.0 vor dem Hintergrund des Bauwesens _____	87
Abbildung 5-2: Das Paradigma <i>Digitale Abbilder</i> _____	90
Abbildung 5-3: Digitale Abbilder innerhalb von Cloud-Plattformen _____	91
Abbildung 5-4: Daten und Services des CDT _____	96
Abbildung 5-5: Dreistufiger Funktionsumfang der Digital Twin Construction _____	97
Abbildung 5-6: Struktur der Datenhaltung in Funktionsstufe 1 _____	98
Abbildung 5-7: Struktur der Datenhaltung in Funktionsstufe 2 a _____	100
Abbildung 5-8: Struktur der Datenhaltung in Funktionsstufe 2 b _____	101
Abbildung 5-9: Struktur der Datenhaltung in Funktionsstufe 3 _____	103
Abbildung 5-10: Bauprojekt-Controlling auf Basis der DTC _____	105
Abbildung 5-11: Dauer, Menge und Geschwindigkeit von Datenerfassung _____	107
Abbildung 5-12: Manuelle Verarbeitung von Informationen bei auftretenden Ereignissen _	109
Abbildung 5-13: Automatisierte Verarbeitung von Informationen bei auftretenden Ereignissen _____	110
Abbildung 5-14: RK BPC während der Bauausführung mit Störgrößenaufschaltung _____	113
Abbildung 5-15: Hierarchische Steuerungs- und Regelungsstrukturen _____	117
Abbildung 6-1: Übersicht der Datenmodelle mit Input und Output im Realisierbarkeitstest	126
Abbildung 6-2: DTC im Realisierbarkeitstest _____	135
Abbildung 6-3: Design-Prozess _____	136
Abbildung 6-4: Prozess: Bauablaufplanung _____	137
Abbildung 6-5: Prozess: Vorbereitende Maßnahmen für die modellbasierte Angebotskalkulation _____	138
Abbildung 6-6: Prozess: Modellaktualisierung _____	141
Abbildung 6-7: Prozess: Modellvergleich _____	142
Abbildung 6-8: Geometrischer und semantischer Modellvergleich _____	143
Abbildung 6-9: Prozess: Aufbereitung der Modelldaten für den Absteckungsprozess _____	145
Abbildung 6-10: Prozess: Modellbasierte Absteckung auf der Baustelle _____	146
Abbildung 6-11: Baustellenbezogene Prozesse _____	148
Abbildung 6-12: Geometrischer Vorabgleich des Leistungserfassung _____	149
Abbildung 6-13: Prozess: Aggregation von Monitoring-Daten _____	151
Abbildung 6-14: Prozess: Manuelle Eingabe des Leistungsstandes _____	152

Abbildung 6-15: Prozess: Vergleich der Monitoringdaten mit dem Planmodell _____	154
Abbildung 6-16: Überlagerung des Plan-Modells mit der Punktwolke _____	155
Abbildung 6-17: Abweichungen beim Vergleiche der Punktwolke mit dem Planmodell ____	156
Abbildung 6-18: Die AVA-Software als Teil der DTC _____	159
Abbildung 6-19: Prozess: Generierung modellbasierter Leistungs- resp. Rechnungsmengen	161
Abbildung 6-20: Die grafische Benutzungsoberfläche als Teil der DTC _____	164
Abbildung 6-21: Prozess: Generierung der grafischen Benutzungsoberfläche _____	164
Abbildung 6-22: Dashboard: Übersicht KMB _____	165
Abbildung 6-23: Dashboard: Darstellung der Abweichung einer Stützenverstärkung ____	167
Abbildung 6-24: Dashboard: Übersicht LSW Flörsheim _____	167
Abbildung 6-25: Dashboard: Darstellung des Abrechnungszustandes _____	169
Abbildung 6-26: Dashboard: Darstellung der Stahlliste _____	170
Abbildung 6-27: Die Archivierung als Teil der DTC _____	171

Abkürzungsverzeichnis

AG	Auftraggeber
AN	Auftragnehmer
BIM	Building Information Modeling (Gebäudeinformationsmodell)
BPC	Bauprojekt-Controlling
bspw.	Beispielsweise
CDE	Common Data Environment
CDT	Construction Digital Twin
CEP	Complex Event Processing
DS	Digital Shadow (Digitaler Schatten)
DT	Digital Twin (Digitaler Zwilling)
DTA	Digitale Abbilder
DTC	Digital Twin Construction
ff	nach einer Seitenzahl und folgenden Seiten
Hrsg.	Herausgeber
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
IoE	Internet of Everything (Internet von Allem)
IoT	Internet of Things (Internet der Dinge)
KMU	Kleine und mittelständige Unternehmen
PII	Project Intent Information
PIK	Project Intend Knowledge
PSI	Project Status Information
PSK	Project Status Knowledge
resp.	respektive
RK	Regelkreis
S.	Seite
SSoI	Single Source of Information
TVM	Tunnelvortriebsmaschine
u.a.	unter anderem
usw.	und so weiter

UAV Unmanned Aerial Vehicle

vgl. vergleiche

z.Bsp. zum Beispiel

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Prüfmetrik	130
Tabelle 2: Bewertungsmatrix.....	172

1. Einleitung

Das Baugewerbe erfordert unter anderem in den Prozessen der Planung und Ausführung ein hohes Maß an Effizienz. Diese ist im Kontext der Leistungserbringung bei einer Unikatfertigung, wie sie im Bereich des Ingenieurbaus zu einem überwiegenden Teil vorzufinden ist, von substantieller Bedeutung.¹ Die Effizienz von Verfahren und Methoden bei Planungsleistungen, Bauleistungen oder Baudienstleistungen innerhalb einer Bauprojektorganisation wird maßgeblich durch die Produktivität, spezifischer durch die Kombination unterschiedlicher Produktionsfaktoren bestimmt.² Daher besteht ein kontinuierlicher Bedarf an Verbesserungen der Effizienz sowie der Effektivität dieser Produktionsfaktoren, zu denen unter anderem die Leitung, die Planung sowie die Kontrolle des Baubetriebs und seiner Organisation als dispositive Faktoren zählen.³ Darüber hinaus etabliert sich Wissen vermehrt als eigenständiger Produktionsfaktor.⁴ Steht dieses in strukturierter und automatisierter Form den Projektbeteiligten zur Verfügung, so können bspw. Prognosen auf einer breiten Informationsbasis aufgebaut werden. Dadurch könnte wiederum eine möglichst störungsarme Bauausführung gewährleistet und folglich eine Steigerung der Produktivität erreicht werden.

Den zentralen Aspekt von Verbesserungsbestrebungen bildet neben den technischen Faktoren vor allem der Mensch. Er bildet das Zentrum der Entwicklung von realitätsnahen und praktikablen Methoden und Verfahren. Ohne seine konzeptionellen Fähigkeiten blieben viele Entwicklungen hinter ihren Möglichkeiten.⁵ In der aktuellen Zeit umgreifender technologischer Fortschritte ist es folglich essenziell, die bestehenden sozio-techno-ökonomischen Systeme in Einklang mit den Prozessen der digitalen Transformation zu bringen. Denn werden die Potenziale der digitalen Transformation sinnvoll umgesetzt, so resultieren neben der Verbesserung in technologischen Belangen auch Verbesserungen der Arbeitsbedingungen für das Personal in den verschiedenen Bereichen von der Planung bis zur Bauausführung von Bauprojekten. Damit verbunden steigt ebenso der technische und ökonomische Erfolg des Projektes sowie der Organisation.⁶ Die Frage nach einer Steigerung der durch den Menschen vorgegebenen Prozessgeschwindigkeit in der Umsetzung von Bauprojekten im Bereich Ingenieurbau bildet infolgedessen den Nukleus dieser Arbeit. Lösungsansätze sollen durch die Betrachtung ausgewählter Problemstellungen innerhalb aktueller Bauprojekte gefunden und umgesetzt werden.

Für ein Verständnis dieses Kernaspekts wird nachfolgend im Allgemeinen die Ausgangssituation der Arbeit sowie die auftretende Problemstellung dargestellt, die Zielsetzung wird erläutert und es wird ein Überblick über den mehrstufigen Aufbau der Arbeit gegeben. Im Anschluss erfolgt die Darstellung der verwendeten Forschungsmethodik sowie eine Eingrenzung des Untersuchungsgegenstandes inklusive getroffener Annahmen.

¹ Vgl. Motzko 2013, S. V.

² Vgl. Hofstadler 2014, S. 16.

³ Vgl. Motzko 2013, S. V.

⁴ Vgl. Hofstadler 2014, S. 17.

⁵ Vgl. Hofstadler & Motzko 2021, S. IX.

⁶ ebenda

1.1. Ausgangssituation und Problemstellung

Die allgemeine Arbeitsproduktivität im Baugewerbe in Deutschland und in anderen Teilen Europas weist eine nachlassende Dynamik, teils eine Stagnation in der Produktivität auf.⁷ Abbildung 1-1 stellt diesbezüglich die jahresdurchschnittliche Veränderung der Arbeitsproduktivität seit 1995 dar. Es lässt sich eine Veränderung erkennen, die eher gering, teils negativ ausfällt. Es wurden alternierende Sprünge erfasst, die bspw. in Deutschland zwischen +1 und – 1 Prozent betragen. Generell ist in keinem der dargestellten Länder ein klarer Trend der Entwicklung zu erkennen.

Die Arbeitsproduktivität ist im eigentlichen Sinne ein Maß für die Leistungsfähigkeit einer Volkswirtschaft.⁸ Sie lässt sich vor dem Hintergrund des Bauwesens jedoch auf die Bezeichnung der Produktivität reduzieren. Dies ist darauf begründet, dass die Bauleistungen als solche auf den Baustellen erbracht werden, auch wenn ein Teil der Bauproduktion aus technologischen, wirtschaftlichen, zeitlichen oder aus Qualitätsgründen in Fertigteilverken vorgefertigt werden können.⁹

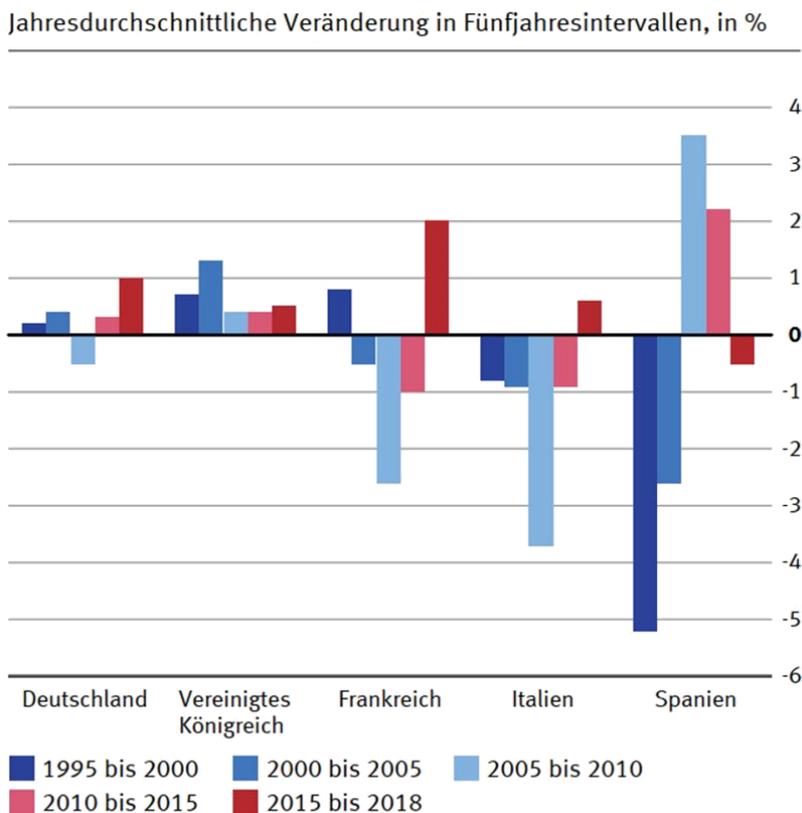


Abbildung 1-1: Arbeitsproduktivität im Baugewerbe¹⁰

⁷ Vgl. Kuntze & Mai, S. 14.

⁸ ebenda

⁹ Vgl. Hofstadler 2014, S. 13.

¹⁰ Kuntze & Mai, S. 15.

Der in Abbildung 1-1 dargestellte Verlauf der Veränderung der Arbeitsproduktivität ist in der aktuellen Zeit, in der in anderen Wirtschaftszweigen teils disruptiv technologischer Fortschritt erzielt wird, bedingt verständlich. So entstehen in diesen Zweigen gänzlich neue Organisationsformen durch eine umfangreiche informationstechnische Vernetzung. Innovative Geschäftsmodelle fordern diesbezüglich etablierte Strukturen heraus. Im Allgemeinen lässt sich ein hohes Potenzial für Produktivitätssteigerungen vermuten. Im Baugewerbe setzt dies gemäß Abbildung 1-1 jedoch nicht ein.¹¹

Worauf ist dies zurückzuführen? Es wird vermutet, dass mehr Zeit gebraucht werde, bis ein Erfolg sichtbar und die Produktivitätssteigerung Gewinne erzielen werde. Man befände sich aktuell in einer Anfangsphase mit hohem Investitionsaufwand.¹²

Eine andere Perspektive auf das Bauwesen zeigt in dieser Hinsicht, dass eben solche Investitionen längst getätigt werden. Es lässt sich folglich ein hoher Grad an Digitalisierung erkennen, wonach zahlreiche Prozesse hoch technologisiert ablaufen. Beispielsweise fahren Baumaschinen teils autonom und Tunnelvortriebsmaschinen (TVM) setzen näherungsweise ganzheitlich automatisiert Tübbinge¹³ in einer berechneten Form und Drehung im Zuge des Tunnelvortriebs an den Tunnelwänden ab.¹⁴

Schlussfolgernd besteht vornehmlich ein Defizit in der Einbindung technischer Weiterentwicklungen in Projekten im Bauwesen, nicht in der Entwicklung selbst. Infolgedessen stellt nicht der Grad der Digitalisierung eine Herausforderung dar, sondern der Grad der digitalen Transformation. Digitalisierung meint zuerst die Umwandlung von analogen in digitale Prozesse, bspw. bei der Umwandlung von manuellen Schriften auf Papier in digitale Formate, sodass diese von digitalen technischen Systemen verarbeitet werden können. Die digitale Transformation wird hingegen fälschlicherweise ebenfalls als Digitalisierung bezeichnet, meint jedoch eine Neuentwicklung von Prozessen durch fortschrittliche Technologien, neue Arbeitsformen oder neue Produktionsverfahren.¹⁵ Sie stellt einen fortlaufenden, auf digitalen Technologien begründeten Veränderungsprozess dar.¹⁶ Auf das Bauwesen bezogen bedeutet dieser Veränderungsprozess eine Anpassung oder eine Neugestaltung jeglicher Abläufe der Projektabwicklung in sämtlichen Bauphasen. Zu beachten ist jedoch, dass nicht die Digitalisierung der Prozesse als das Revolutionäre gilt, sondern die Möglichkeit der Vernetzung der entsprechenden technischen Systeme in Echtzeit.¹⁷ Kern einer solche Vernetzung aller technischer Systeme in Echtzeit sind sog. *Cyber-Physische Systeme* (CPS) und das *Internet of Things* (IoT). Eine horizontale Vernetzung¹⁸ wird durch

¹¹ Vgl. Kuntze & Mai, S. 20.

¹² ebenda

¹³ Tübbinge sind vorgefertigte Stahlbetonsegmente, aus denen ein Aussteifungsring für den maschinellen Tunnelvortrieb besteht. Viele aneinandergereihte Ringe ergeben die Aussteifung des Tunnels

¹⁴ Vgl. Finzel 2020.

¹⁵ Vgl. Franzetti 2019, S. 223.

¹⁶ Vgl. Lexa 2021, S. 11.

¹⁷ Vgl. Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik WGP e. V. 2016, S. 3.

¹⁸ Horizontale Vernetzung beschreibt unter anderem die Verbindung von zentralen Systemen mit Maschinen bspw. über mobile Datenverbindungen

die Nutzung des IoT und eine vertikale Vernetzung¹⁹ durch die Einbeziehung von CPS ermöglicht.²⁰

Projiziert man die genannte Differenzierung auf die vorab dargestellte Diskrepanz, so wird erkennbar, dass die digitale Transformation in denjenigen Industriezweigen weiter fortgeschritten ist, in denen ein größerer Anteil an Technologie als Erzeugnis im Geschäftsmodell besteht und somit ein wesentlicher Teil der Produkte materiell vorhanden ist. Plakativ sind diesbezüglich der Bereich der Herstellung von Baumaschinen oder geodätischer Geräte zu nennen. In den Bereichen, in denen ein Großteil an immateriellen Leistungen erbracht wird, wird ein Fortschritt in eher geringem Umfang erreicht. Einen derartigen Bereich stellen die Planung und Ausführung von Bauwerken dar und belegen somit die Kernaussage aus Abbildung 1-1. Obgleich das fertige Bauwerk als solches als materiell anzusehen ist, so ist ein nicht unerheblicher Teil der Verfahren zur Transformation des Bauwerks aus der Planung in das finale Produkt trotz starker Mechanisierung bis dato mit einem erheblichen Aufwand durch händische Tätigkeiten geprägt. Der Mensch gibt letztendlich die Geschwindigkeiten der Prozesse vor und bildet als primäre ausführende Kraft das zentrale Bindeglied in der sozio-ökonomisch-technischen Struktur des Bauwesens.²¹

Der Aspekt der Prozessgeschwindigkeit stellt nicht die einzige Problemstellung im Zuge der digitalen Transformation im Bauwesen dar. Vielmehr ist diese als vielschichtig anzusehen. Mitunter sind die Aspekte der Veränderlichkeit der Randbedingungen zu nennen, denen die Baustellen ausgesetzt sind sowie eine unterschiedliche Zusammensetzung von Produktionsverfahren, deren Auswahl maßgeblich die Produktivität innerhalb der Ausführungsprojekte beeinflussen. So wird in Abgrenzung zur stationären Industrie die Baustellenfertigung maßgeblich durch Witterungseinflüsse sowie eine dynamisch veränderliche Umgebung der Baustelle bestimmt.²² Darüber hinaus gilt, dass die genannten und noch weitere Produktionsfaktoren signifikante Auswirkungen unter anderem auf Ausführungsdauer und -kosten haben. Zeitgleich werden dadurch die Baustellenlogistik sowie der Bauprozess im Allgemeinen maßgeblich beeinflusst.²³

Unter anderem aufgrund wechselnder Randbedingungen und dezentralen Produktionsstätten haben sich im Verlaufe der letzten Jahrzehnte Bauverfahren entwickelt, die eine effiziente Errichtung der jeweiligen Bauwerke ermöglichen. Von wesentlicher Bedeutung ist in diesem Zusammenhang die Produktivität resp. die Produktleistung in allen Projektphasen.²⁴ Vor dem Hintergrund von Innovation und Disruption besteht indes ein Spannungsfeld zwischen diesen konservativen Bauverfahren, die die angesprochene hohe Zuverlässigkeit und Effizienz besitzen und solchen Prozessen, die durch weitreichende digitale Transformation weitestgehend automatisiert ablaufen, jedoch durch neue Arbeitsmethoden umgesetzt werden müssen. Unternehmen werden sich mit den Themen Innovation und Disruption vor dem Hintergrund der Beibehaltung

¹⁹ Vertikale Vernetzung beschreibt den In- und Output von Maschinen bspw. mittels Sensorik und Aktorik

²⁰ Vgl. Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik WGP e. V. 2016, S. 6.

²¹ Vgl. Motzko, et al. 2021, S. 660.

²² Vgl. Motzko 2013, S. 5.

²³ Vgl. Hofstadler & Kummer 2021, S. 1.

²⁴ Vgl. Hofstadler 2014, S. 1.

der eigenen Kernprozesse beschäftigen und sich ggf. bekannten und häufig verwendeten Prozessen entledigen müssen.²⁵ Denjenigen Unternehmen, die sich nicht auf eine radikale disruptive Innovation im Sinne einer grundlegenden technologischen Revolution einlassen können, kann der Ansatz der evolutionären Innovation nach Clayton-Christensen gemäß Abbildung 1-2 eine Möglichkeit bereiten. Dieser gibt an, dass disruptive Innovation und evolutionäre Innovation nebeneinander existieren.

Bei disruptiven Innovationen und den dort verorteten technischen Neuerungen besteht meist zu anfangs eine Unterlegenheit in der Produktivität gegenüber der bestehenden Prozesse.²⁶ Sie müssen sich zunächst auf dem Markt festigen, bevor sie in ihrer Produktivität die untere Wirtschaftlichkeitsgrenze erreichen und dadurch langfristig Mehrwerte generieren. Ab diesem Zeitpunkt erfolgt jedoch meist eine überlineare Steigerung der Produktivität.

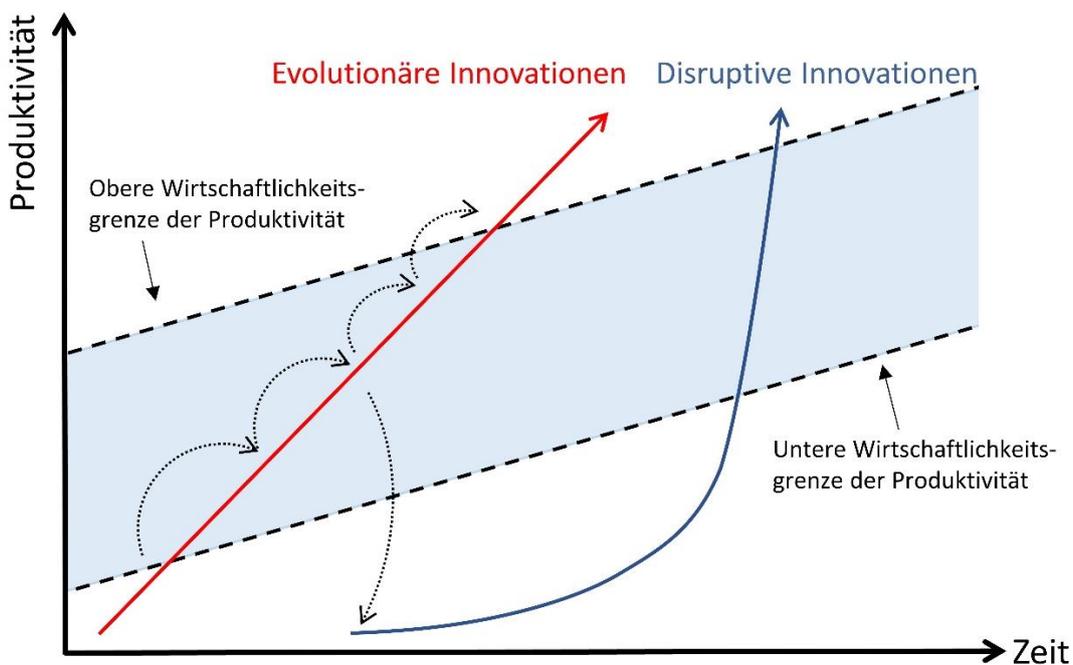


Abbildung 1-2: Evolutionäre und disruptive Innovationen anhand der Anforderungskurven²⁷

Im Zuge einer evolutionären Innovation basiert die Weiterentwicklung bestehender Prozesse auf einer inkrementellen Fortentwicklung. Es besteht entgegen dem disruptiven Ansatz keine Neuerung auf einer ganzheitlichen Basis. Für ein Unternehmen mit hohem Auftragsbestand an langlaufenden Projekten, wie es der Praxispartner dieser Arbeit als Generalunternehmen im

²⁵ Vgl. Sack & Schrewe 2021, S. 367.

²⁶ Vgl. Motzko & Mehr 2018, S. 397.

²⁷ Eigene Darstellung in Anlehnung an Knöchermann 2014, S. 7.

Bereich Infrastruktur darstellt, so ist es nur bedingt möglich einen disruptiven Ansatz zu verfolgen, da unter anderem die bestehenden Projekte weiterhin über viele Jahre *konventionell*²⁸ umgesetzt werden müssten.²⁹ Die evolutionäre Innovation bietet diesbezüglich die Möglichkeit kleinere technische Entwicklungsschritte innerhalb des Unternehmens zu implementieren und dabei das Personal und dessen Expertise einzubeziehen, um dadurch eine Steigerung der Produktivität der Planungs- oder Bauverfahren zu erreichen.

Betrachtet man folglich die Vorgabe der Prozessgeschwindigkeit innerhalb der Bauprozesse durch den Menschen und deren stufenweise Entwicklung gemäß der evolutionären Innovation, so stellt die Geschwindigkeit bei der Erfassung, Bereitstellung und Interpretation von Informationen³⁰ eine zentrale Größe dar. Schreitet die Entwicklung von technischen Systemen weiterhin in einer hohen Geschwindigkeit voran und bleibt hingegen die Prozessgeschwindigkeit durch den Menschen auf einem konstanten Level, kann folglich keine Steigerung der Produktleistung resp. der Produktivität in Sinne der evolutionären Innovation erfolgen.

²⁸ *konventionell* bedeutet in diesem Zusammenhang die Umsetzung mit bestehenden Verfahren und Methoden ohne einen disruptiven Ansatz

²⁹ Vgl. Sack & Schrewe 2021, S. 372.

³⁰ Bodendorf 2006, S. 1: Informationen sind Daten, denen eine Bedeutung vor einem spezifischen Kontext zugeordnet wird

1.2. Zielsetzung

Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit besteht in der wissenschaftlichen Entwicklung einer Regelungsmöglichkeit, die zu einer Beschleunigung der durch den Menschen vorgegebenen Prozessgeschwindigkeit innerhalb von Bauprojekten führt. Erreicht werden soll dies durch die Betrachtung ausgewählter Problemstellungen innerhalb aktueller Bauprojekte sowie durch die Umsetzung ausgewählter zugehöriger Lösungsansätze. Um dieses Ziel zu erreichen, orientiert sich der Verfasser dieser Arbeit an zwei Forschungsfragen. Die erste ergibt sich aus der Eingangsproblematik vor dem Hintergrund der digitalen Transformation.

- 1) Welche Problemstellungen existieren aktuell in der Projektbearbeitung vor dem Hintergrund der digitalen Transformation in Praxis und Theorie?

Diesbezüglich werden ausgewählte vergangene Forschungsprojekte des Instituts für Baubetrieb an der Technischen Universität Darmstadt auf Potenziale im Hinblick auf die digitale Transformation betrachtet. Daraus resultierende Kernelemente werden wiederum als Ausgangsbasis für einerseits die Umsetzung zweier empirischer Untersuchungen verwendet, andererseits wird auf dieser Basis der zugehörige aktuelle Stand der Forschung ermittelt. Die daraus hergeleitete Forschungslücke bildet das Grundgerüst der zweiten Forschungsfrage.

Bei Betrachtung des aktuellen Stands der Forschung hinsichtlich Digitaler Abbilder sowie der Automatisierung von Prozessen im Bauwesen wird im Allgemeinen deutlich, dass ein Großteil der der Forschung entsprechenden Prozesse aus der Makroebene betrachtet wird und eine Erprobung auf praktischer Ebene lediglich geringfügig erfolgt. Bezogen auf die Prozesse in der Sphäre eines Bauunternehmens wird ein Mangel an Forschung in der Automatisierung innerhalb der Steuerung von Bauprojekten, speziell bei der zeitnahen Projektsteuerung sowie der Entscheidungsfindung innerhalb des Controllingprozesses erkannt. Die zweite Forschungsfrage gestaltet sich daher wie folgt:

- 2) Wird eine Steigerung des Automatisierungsgrades bei einer quasi-kontinuierlichen und selbstregulierenden Datenaktualisierung eines (Echtzeit-) Steuerungsprozesses mit bis dato auf dem Markt verfügbaren und somit praxisnahen Mitteln erreicht?

Um dem *Wechselspiel zwischen Theorie und Praxis*³¹ nach HELFRICH Rechnung zu tragen, werden Problemstellungen aus der Praxis vor dem Hintergrund des aktuellen Stands der Forschung beleuchtet, in ein Modell überführt und innerhalb der Praxis geprüft. Aus diesem Grund gilt als Rahmenbedingung die Vorgabe, ausschließlich diejenigen technischen Möglichkeiten zu verwenden, die dem aktuellen Stand der Praxis entsprechen und auf dem aktuellen Markt verfügbar sind. Dies sichert zu einem Teil das Einhalten des Praxisbezugs, der innerhalb der Baubetriebswissenschaft gefordert wird. Der zweite Teil wird durch die Fokussierung auf das Bauprojekt-Controlling erreicht, da dies derjenige zentrale Aspekt innerhalb von Bauprojekten ist, der die Voraussetzungen schafft, um die wirtschaftliche Abwicklung der Bauprojekte zu gewährleisten.³²

³¹ Vgl. Helfrich 2016, S. 3.

³² Vgl. Jacob, et al. 2018, S. 523.

1.3. Aufbau der Arbeit

Strukturell lässt sich die vorliegende Arbeit in sieben Kapitel unterteilen. Abbildung 1-3 dient diesbezüglich als visuelle Verdeutlichung.

Zu Beginn wird in *Kapitel 1* die Ausgangssituation und die zugehörige Problemstellung als Anlass der vorliegenden Arbeit erläutert. Dem folgt die entsprechende Zielsetzung, die dem Untersuchungsgegenstand den Rahmen gibt. Daran anschließend erfolgt die Einordnung der Forschungsmethodik und eine Eingrenzung inklusive getroffener Annahmen.

In *Kapitel 2* werden die aktuellen Problemstellungen der Praxis erörtert. Nach der Verortung der Fachdisziplin Baubetrieb werden diejenigen Forschungsuntersuchungen thematisiert, die bis dato am Institut für Baubetrieb der Technischen Universität Darmstadt durchgeführt wurden und direkten Bezug zu dem der Arbeit zugrundeliegenden Forschungsbereich aufweisen. Eine Ermittlung von Problemstellungen aus der Praxis wird durch zwei empirische Untersuchungen hergestellt, bei der in der ersten ein Gruppeninterview in Form einer sog. Fokusgruppe und in der zweiten Expertiseinterviews³³ durchgeführt werden. Den Abschluss des Kapitels bildet eine Zusammenfassung im Sinne eines Erkenntnisgewinns aus der empirischen Untersuchung.

Kapitel 3 behandelt die Grundlagen der vorliegenden Arbeit. Da das allgemeine Projekt-Controlling als zentrales Bezugsthema der Arbeit gilt, wird der zugehörige Themenkomplex aus der allgemeinen Kybernetik hergeleitet. Darin werden grundlegende Begrifflichkeiten definiert, deren tieferes Verständnis eine Notwendigkeit zum Begreifen der vorliegenden Arbeit bilden. Als praxisorientierter Untersuchungsgegenstand gilt das projektbezogene Bauprojekt-Controlling (BPC) inklusive der innewohnenden Steuerungs- sowie Regelungssystematik. Handlungs- und Bezugsrahmen bildet diesbezüglich die digitale Transformation sowie der zugehörige grundlegende Gedanke der Automatisierung.

In *Kapitel 4* wird der allgemeine Stand der Forschung derjenigen Themenkomplexe erläutert, die unter den Grundlagen in *Kapitel 3* den Handlungsrahmen bilden. Dazu gehören unter anderem das allgemeine Gebiet der Industrie 4.0 sowie der zugehörigen Kerntechnologien. Diese bilden den Rahmen für internationale Forschungsthemen über Methoden der sog. Digital Twin Construction, welche wiederum auf der Methode Building Information Modeling (BIM) basiert. Den Abschluss von *Kapitel 4* bildet die aus den Grundlagen aus *Kapitel 3* und dem Stand der Forschung aus *Kapitel 4* zusammengefassten Forschungslücke.

³³ Aufgrund der Genderneutralität wird in der vorliegenden Arbeit vorwiegend der Term „Expertiseinterview“ verwendet. In der betrachteten Fachliteratur wird hingegen der Begriff „Experteninterview“ von den jeweiligen Verfassenden verwendet. Aus diesem Grund wird der ursprüngliche Begriff in Zitaten oder Literaturangaben zu der jeweiligen Fachliteratur weiterhin verwendet.

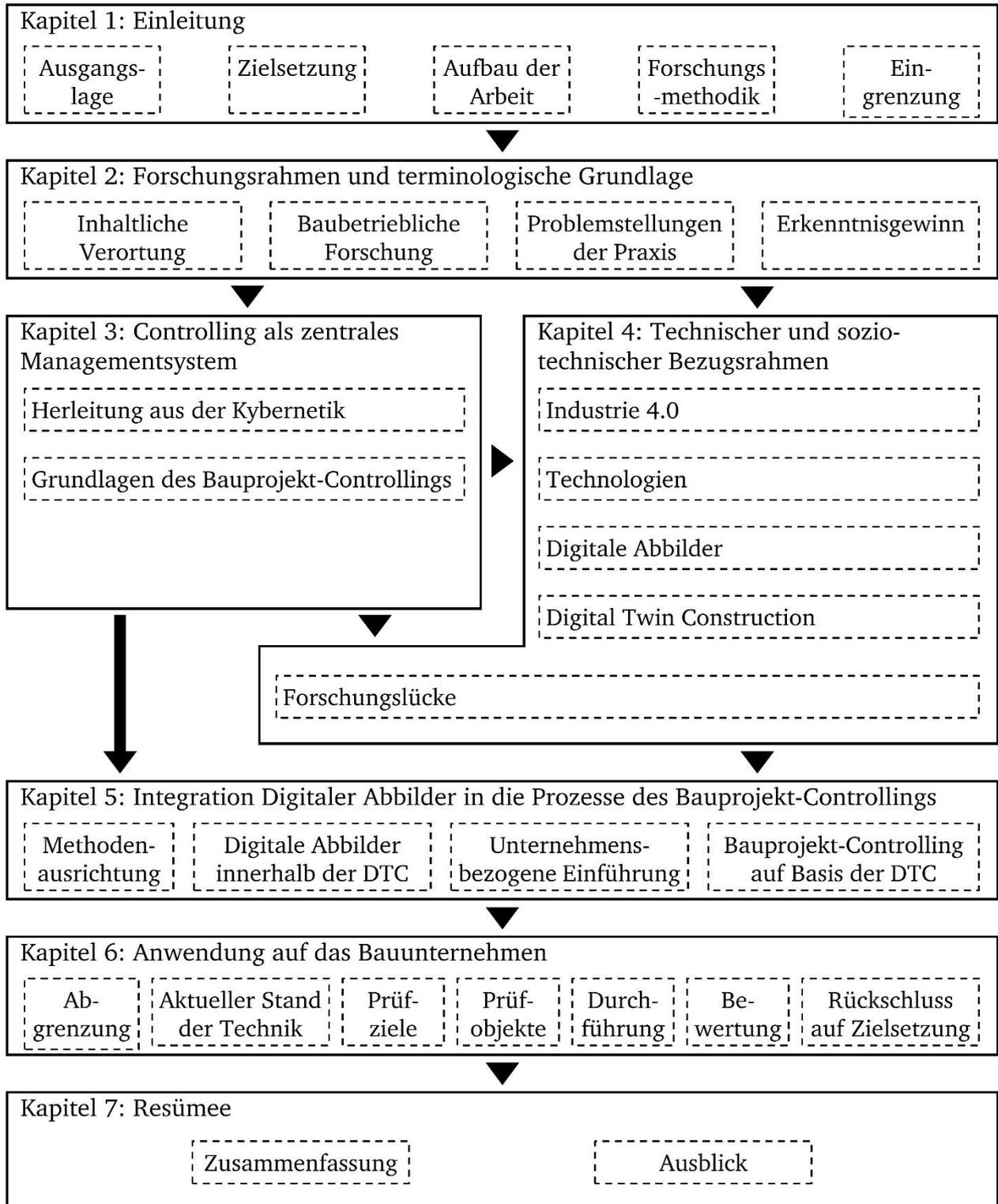


Abbildung 1-3: Aufbau der Arbeit³⁴

³⁴ Eigene Darstellung

In *Kapitel 5* erfolgt die Bildung des der Arbeit zugrunde liegende Prozessmodells. Es wird der in den Grundlagen dargestellte Handlungsrahmen mit dem in Kapitel 4 ermittelten Stand der internationalen Forschung zusammengeführt. Dabei wird anfangs ein Bezug der Industrie 4.0 mit dem Bauwesen hergestellt, was als Rahmen für das neu entwickelte Paradigma Digitaler Abbilder gilt. Dieses Paradigma wird grundlegend definiert, sodass eine klare Vorstellung für die Begriffe Digitales Modell, Digitaler Schatten und Digitaler Zwilling in Bezug auf Bauwerksinformationsmodelle im Bauwesen gelten sollte. Es folgt eine Konzipierung für ein dreistufiges Vorgehen bei einer Einführung in einem Bauunternehmen und eine Darstellung der Auswirkungen auf die Datenintegration, ferner auf die Prozessgeschwindigkeit für eine modellbasierte Arbeitsweise. Die unterschiedlichen Stufen der Datenintegration beinhalten wiederum verschiedene Ausprägungen sowohl an Semantik als auch an Rahmenbedingungen für eine zugehörige IT-Infrastruktur. Im Anschluss wird die Methode der Digital Twin Construction auf die Prozesse des Bauprojekt-Controllings angewendet und erläutert. Dabei wird auf ausgewählte Prozessschritte und die zugehörige Änderung innerhalb der Prozessgeschwindigkeit eingegangen. Abgeschlossen wird das Kapitel mit der Entwicklung einer Prozessübersicht mit Steuer- und Regelkreismechanismen, die eine Beschleunigung bei Entscheidungsprozessen innerhalb des Bauprojekt-Controllings ermöglichen.

Der entwickelte Regelungsprozess inklusive Steuerkreis wird in Kapitel 6 in der Praxis als Realisierbarkeitstest zum Erfüllen des wissenschaftlichen Anspruchs durchgeführt. Diesbezüglich erfolgt zu Beginn des Kapitels eine Eingrenzung, da es nicht möglich ist, in der Forschungsarbeit das Prozessmodell in Gänze innerhalb eines oder mehrerer Bauprojekte zu untersuchen. Dies liegt vor allem am Umfang der beim Praxispartner durchgeführten Ausführungsprojekte. Diese erstrecken sich zu großen Teilen mindestens auf fünf Jahre und sind somit für den Forschungsgegenstand zu langläufig. Nach der Abgrenzung wird ein Bewertungsrahmen festgelegt, anhand dessen eine objektive Bewertung des zugehörigen Automatisierungsgrades erfolgen soll. Im Anschluss wird der Realisierbarkeitstest mit ausgewählten Detaillierungsstufen beschrieben. Das Kapitel schließt mit der Bewertung des Realisierbarkeitstests vor dem Hintergrund des festgelegten Bewertungsrahmens, ferner werden Rückschlüsse auf die eingangs erstellte Zielsetzung und ebenfalls auf die Forschungsfragen gezogen.

Den Abschluss der Arbeit bildet *Kapitel 7* mit einer Zusammenfassung der Vorgehensweise und der Ergebnisse sowie mit einer Darstellung möglicher weiterer Forschungsgegenstände als Ausblick.

1.4. Forschungsmethodik der Arbeit

Die in der vorliegenden Arbeit gewählte Forschungsmethodik soll der Wissenschaftlichkeit genügen. Ziel einer wissenschaftlichen Forschung ist nach GIRMSCHEID die Verbesserung des Wissens durch Erkenntnisgewinn.³⁵ Zur Erreichung dieses Ziels müssen die jeweils angewendeten Forschungsparadigmen den Anforderungen an die Wissenschaftlichkeit entsprechen. Diesbezüglich wird nachfolgend zuerst der wissenschaftstheoretische Hintergrund der Arbeit inklusive der notwendigen Anforderungen an die Wissenschaftlichkeit beschrieben. Darauf aufbauend erfolgt die Bestimmung der Forschungsmethode.

Nach POPPER wird Wissenschaftlichkeit resp. wissenschaftliche Objektivität durch intersubjektive Nachprüfbarkeit erreicht. Somit soll es Dritten möglich sein, die Durchführung der Untersuchung nachprüfen zu können.³⁶ Grundlagen der Wissenschaftlichkeit sind infolgedessen *Objektivität* und *Wahrheit*. Erstere wird in der vorliegenden Untersuchung durch Offenlegung des Vorgehens bei der Durchführung erreicht. *Wahrheit* wird für den Bereich der Baubetriebswissenschaften im Sinne von ULRICH durch *Nützlichkeit* substituiert.³⁷ Entgegen den kausalen Erklärungsmodellen der nomothetischen Wissenschaften, bilden die hermeneutischen Realwissenschaften indes phänomenologische Erklärungsmodelle.³⁸ Die *Nützlichkeit* erreicht somit vor dem Hintergrund der sozio-technischen Umwelt eine adäquate Abstraktion der Wahrheitsprüfung durch den Entwurf von praxisbezogenen Handlungsalternativen zur Gestaltung von Wirklichkeitsausschnitten. Folgerichtig gilt nicht die Falsifizierbarkeit als Kriterium der baubetrieblichen Wissenschaft, sondern die *Nützlichkeit* der Handlungsalternativen.³⁹ Dies kann entweder durch die Einbettung der Handlungsalternativen in ein denklogisch-deduktives Konstrukt in einem theoretischen Bezugsrahmen erfolgen oder durch die Einbindung validierter sowie reliablierter empirischer Erkenntnisse in die Durchführung eines Realisierbarkeitstests zur Prüfung der intendierten Wirkung.⁴⁰ In der vorliegenden Arbeit wird diese Güteprüfung durch die Durchführung von Realisierbarkeitstests erreicht.

Auf Basis der Wissenschaftstheorie sind Handlungsalternativen im Bereich der Baubetriebswissenschaften differenzierter zu betrachten. Als Forschungsergebnisse können sie unter anderem in Form von an Landkarten angelehnten Modellen dargestellt werden.⁴¹ Solche Modelle unterliegen dem kontinuierlichen Prozess der Anpassung, welcher zu keiner Zeit als abgeschlossen anzusehen ist. Ausgangspunkt diesbezüglich ist die Annahme, in Handlungswissenschaften werde grundsätzlich unvollständiges Wissen verarbeitet, denn aus dem Bedarf, praktische Handlungen abzuleiten, resultiere eine unbegrenzte Zahl an möglichen Handlungssituationen.⁴² Somit entsteht die Erkenntnis, gewonnene Informationen sowie Handlungen können

³⁵ Girmscheid 2014, S. 55.

³⁶ Vgl. Popper 2010, S. 144.

³⁷ Siehe Ulrich 1985, S. 165.

³⁸ Vgl. Ulrich & Hill 1979, S. 305.

³⁹ Vgl. Girmscheid 2007, S. 74.

⁴⁰ Vgl. Girmscheid 2007, S. 73.

⁴¹ Vgl. Girmscheid 2007, S. 57–58.

⁴² Vgl. Kornwachs 2013, S. 18.

nicht notwendigerweise frei von Irrtümern sein und alle Ergebnisse sind stets zu reflektieren. Das Resultat ist infolgedessen eine kontinuierliche, jedoch nicht sequenziell verlaufende Wechselwirkung zwischen Theorie und Praxis. Nach HELFRICH sei gar die Hauptaufgabe der Wissenschaftstheorie, dem Wechselspiel zwischen Theorie und Praxis Rechnung zu tragen.⁴³

Die Baubetriebswissenschaft gehört als Handlungswissenschaft zu den hermeneutischen Realwissenschaften.⁴⁴ Vor diesem Hintergrund wird ein hermeneutisches Multi-Forschungsparadigma gewählt. Diesbezüglich wird in dieser Arbeit der Ansatz der Zusammenführung des interpretativistischen mit dem konstruktivistischen Forschungsparadigma nach GIRMSCHIED verfolgt. Dabei erfolgt ein vorangehender Erkenntnisgewinn durch ein empirisch induktives Vorgehen im Sinne des hermeneutischen Interpretativismus vor einer praxisnahen Modellbildung auf Basis des Konstruktivismus.⁴⁵

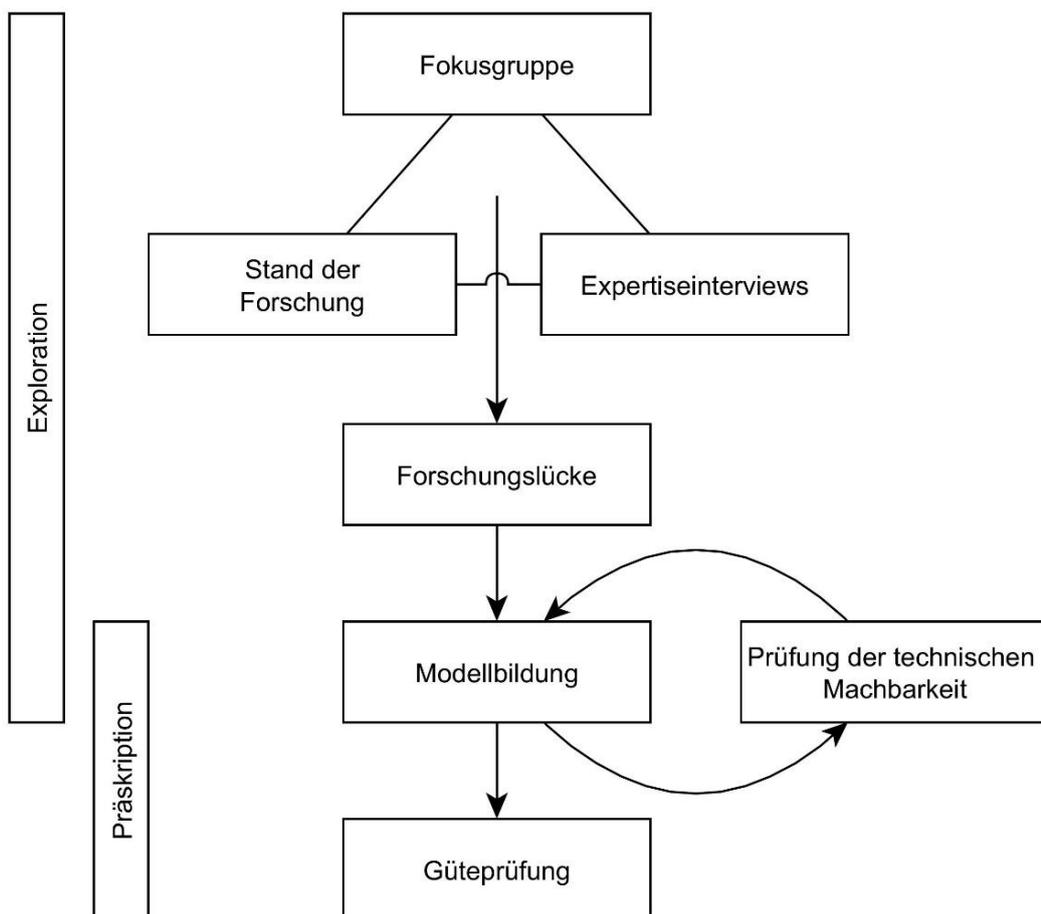


Abbildung 1-4: Ablauf der Forschungsmethode⁴⁶

⁴³ Vgl. Helfrich 2016, S. 3.

⁴⁴ Vgl. Girmscheid 2007, S. 66.

⁴⁵ Vgl. Girmscheid 2007, S. 68.

⁴⁶ Eigene Darstellung

Das explorative Erschließen der Forschungslücke erfolgt gemäß Abbildung 1-4 anhand einer Triangulation aus zwei unabhängigen qualitativen Inhaltsanalysen, gekoppelt mit einer Dokumenten- respektive Literaturanalyse als Stand der Forschung. Die praktische Erkundung der qualitativen Inhaltsanalyse wird einerseits anhand einer Fokusgruppe, andererseits anhand von Expertiseinterviews geführt. Um einen breiten Erkenntnisgewinn zu erzielen, setzt sich die Fokusgruppe aus Mitarbeitenden desselben Unternehmens, jedoch aus unterschiedlichen Fachdisziplinen und Standorten zusammen. Die Expertinnen und Experten für die Interviews sind hingegen aus unterschiedlichen Unternehmen gewählt. Es existiert keine Schnittmenge bei der Personenwahl der beiden Untersuchungen.

Das für die vorliegende Arbeit notwendige Verständnis der sozialen Realität resp. der vorherrschenden Wirklichkeit und die gewünschte Praxisnähe werden durch Interpretation der Ergebnisse einer qualitativen Forschungsmethode erreicht. Die einschlägige qualitative Inhaltsanalyse ermöglicht die Zergliederung des Ablaufs in einzelne Interpretationsschritte, welche jedoch vorher festzulegen sind. Dadurch wird sie der Nachvollziehbarkeit und einer intersubjektiven Überprüfbarkeit gegenüber Dritten gerecht und darüber hinaus übertragbar auf andere Gegenstände.⁴⁷

Interviews ermöglichen im Allgemeinen eine verbale Datenerhebung, deren inhaltlicher Wert, bezogen auf den Untersuchungsgegenstand, erhöht informationshaltig ausfallen kann. Durch die Erweiterung dieser verbalen Datenerhebung mit Prozessen einer Gruppeninteraktion sowie einer Gruppendynamik wird neben der Steigerung der Offenheit der Teilnehmenden ebenso die Detailliertheit der Information gefördert, sofern die Personen in der Thematik des Untersuchungsgegenstands einen zueinander äquivalenten Kenntnisstand aufweisen. Aus diesem Grund fällt die Wahl der qualitativen Inhaltsanalyse in der vorliegenden Arbeit auf die sog. Fokusgruppe im Sinne eines semistrukturierten Gruppeninterviewverfahrens.

Die Exploration innerhalb der Forschungsmethode gemäß Abbildung 1-4 wird im Sinne der Problembeschreibung durch das Auffinden der Forschungslücke weitergeführt. Ein interdisziplinär betrachtetes Entwerfen und Gestalten von Modellen und Regeln für die intendierte Zielerreichung in der Praxis erfolgt in Form einer Präskription⁴⁸ auf Basis der aufgedeckten Forschungslücke. Im Sinne der Nützlichkeit der Handlungsalternativen innerhalb der baubetrieblichen Wirklichkeitsausschnitte erfolgt in der Präskription die Modellbildung einer möglichen Lösung der aus der Praxis erhaltenen Problematik. Diese wird vor dem Hintergrund der aktuellen technischen Machbarkeit geprüft und entsprechend angepasst. Je nach Stand der Technik, Stand der Forschung und einer unternehmensbezogenen Machbarkeit können hierbei zahlreiche Anpassungszyklen notwendig werden.

Abschluss des dieser Arbeit zugrundeliegenden Forschungsparadigmas, bestehend aus der Zusammenführung des interpretivistischen mit dem konstruktivistischen Forschungsparadigma, bildet die Durchführung eines Realisierbarkeitstests zur Prüfung der intendierten Wirkung. Die

⁴⁷ Vgl. Mayring 2015, S. 61.

⁴⁸ Präskription = Soll-Vorgaben (vgl. Helfrich 2016, S. 9)

Prüfziele werden nach den Anforderungen gebildet, die aus der Triangulation in der Exploration erfasst werden und entsprechen folglich der Verifikation im Sinne des Forschungsparadigmas. Die Validation erfolgt durch die Erfüllung der aufgestellten Anforderungen während des Realisierbarkeitstests resp. unter dem Ziehen von Rückschlüssen auf die Zielstellung, inwiefern die Resultate zur Erfüllung der Forschungsziele und damit zur Lösung des Praxisproblems beitragen.

1.5. Eingrenzung und Annahmen

In der vorliegenden Arbeit gilt das Postulat, zukunftsorientierte Technologien lassen sich mit konservativen Bauverfahren kombinieren, indem zentrale Prozesse zwar für eine Projektbearbeitung automatisiert und einer Algorithmus basierten Interpretation zugeführt werden können, sie sind jedoch zwingend von Personen der Projektleitung zu bewerten und umzusetzen. Die elektronische Datenverarbeitung wird zukünftig die Grundlage für alle Prozesse innerhalb des Bauunternehmens darstellen. Die Sorgfalt bei der Verwendung der Systematik sowie die Interpretation der Ergebnisse aus Analysen oder Prozessabläufen darf jedoch keineswegs vernachlässigt werden.

Im Laufe dieser Arbeit werden Erfassungsmöglichkeiten polysensoraler Systeme beschrieben, deren technischer Hintergrund jedoch nur oberflächlich und für das allgemeine Verständnis erläutert wird. Für ein vertieftes Verständnis kann eine Vielzahl an Forschungsarbeiten herangezogen werden, die sich mit der Erfassung der Daten auf Baustellen und der Generierung von digitalen Abbildern aus eben diesen Daten beschäftigen.^{49,50,51,52} Hauptaugenmerk der vorliegenden Arbeit liegt folglich auf der Verwendung der resultierenden Modelldaten im Prozess der Projektbearbeitung, ferner im Bauprojekt-Controlling.

Der Themenkomplex des allgemeinen *Controllings* ist ein sehr umfangreicher. Da ein Unternehmen seine Existenz auf Dauer zu sichern hat und Gewinne erwirtschaften muss, wirkt er darauf hin, frühzeitig sich abzeichnende Trends zu erkennen und diese im Unternehmenscontrolling abzubilden. Darin einbezogen ist ebenso die Notwendigkeit frühzeitige Entscheidung auf teils sehr unsicheren Rahmenbedingungen wie äußeren oder inneren Einflüssen oder mangelnden Informationsständen zu treffen.⁵³ Aufgrund der Fülle an Bedingungen, die bei einer Betrachtung von Automatisierungsmöglichkeiten in Controlling-Prozessen gelten, ist eine Eingrenzung innerhalb dieser Arbeit notwendig. Es wird festgelegt, dass das Unternehmenscontrolling nicht als Betrachtungsgegenstand gilt. Es erfolgt somit keine Betrachtung der Thematik der Steuerung und Regelung bezogen auf Prozesse der Unternehmensführung in der Bauwirtschaft.⁵⁴ Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Steuerung und Regelungen von Prozessen der Bauausführung und somit vor dem Hintergrund des Bauprojekt-Controllings.

Eine weitere Eingrenzung erfolgt im baubetrieblichen Rechnungswesen, speziell in der Kosten- und Leistungsrechnung sowie in deren Verknüpfung zum Bauprojekt-Controlling. Dies wird nur an denjenigen Stellen zum Betrachtungsgegenstand, an denen Einfluss auf die Angebotskalkulation sowie die Arbeitskalkulation ausgeübt wird.

⁴⁹ Vgl. Motzko & Mehr 2018.

⁵⁰ Vgl. Motzko & Mehr 2016.

⁵¹ Vgl. Hofstadler 2019.

⁵² Vgl. Glock; Kaufmann & Tschickardt 2021.

⁵³ Vgl. Hofstadler & Kummer 2017, S. VI.

⁵⁴ Vgl. Schwarzwälder 2018, S. 2.

Obwohl die Verwendung zeitnah erfasster Informationen des Baustellen-Monitorings und deren automatisierter Bewertung vor dem Hintergrund des Soll-Zustands der Bauausführung eine verbesserte Prognose des Projektverlaufs ermöglicht, werden Prognostizierungen im engeren Sinne in der vorliegenden Arbeit nicht näher betrachtet. Bei Aussagen über die Zukunft, sowohl im kurz- als auch im mittelfristigen Bereich, werden im Allgemeinen Faktoren der Subjektivität einbezogen.⁵⁵ Da in dieser Arbeit die Automatisierung von Prozessabläufen Betrachtungsgegenstand ist, wird infolgedessen eine subjektive Bewertung ausgeschlossen. Obschon aus der zeitnahen Darstellung von Informationen eine frühzeitige Interpretation durch Personal und somit eine subjektive Entscheidung von Menschen getroffen werden könnte, wird innerhalb des Forschungsvorhabens keine Berechnungsmöglichkeiten oder zugehörige Prozesse betrachtet. Für diese Zwecke wäre eine detaillierte Betrachtung der systematischen Handhabung von Prognoseverfahren mittels vorausschauendem und intelligentem Chancen- und Risikenmanagement notwendig.⁵⁶ Dies würde allerdings den Umfang der Arbeit übersteigen.

Im Allgemeinen werden Chancen und Risiken maßgeblich durch Histogramme, deren ordentlicher Einbeziehung sowie die Risikobereitschaft von Unternehmen geprägt.⁵⁷ Da in der vorliegenden Arbeit lediglich der Prozess als solcher und weder der Inhalt oder eine inhaltsanalytische Vorgehensweise noch die strategische Ausrichtung von Unternehmen betrachtet wird, wird schlussfolgernd eine Betrachtung von Chancen und Risiken ausgeschlossen. Es sei jedoch angemerkt, dass die Komponente *Zeit* einen wesentlichen Bereich innerhalb der Verwendung von Prognoseinformationen ausmachen. Eine frühzeitige resp. zeitnahe Einbindung bisher unbekannter Informationen über Methoden der Künstlichen Intelligenz oder Verfahren zur Analyse mittels Data Analytics ermöglicht eine zügige Interpretation und infolgedessen ebenfalls eine zügige Umsetzung von getroffenen Maßnahmen. Es könnte durch die Projektleitung frühzeitig reagiert werden, sodass mögliche negative Einflüsse von Störungen des Bauablaufs gemindert würden.

Auf die Einbindung von Prognoseinformationen kann jedoch nicht ganzheitlich verzichtet werden. Innerhalb des Bauprojekt-Controllings, spezieller in der Arbeitskalkulation werden Informationen im Zuge der Ist-Prognose-Arbeitskalkulation eingebunden. Dieser Fall im weiteren Verlauf angesprochen und eingebunden.

⁵⁵ Vgl. Hofstadler & Kummer 2017, S. 42.

⁵⁶ Vgl. Hofstadler & Kummer 2017, S. VI.

⁵⁷ Vgl. Hofstadler & Kummer 2021, S. 54.

2. Forschungsbezugsrahmen und terminologische Grundlage

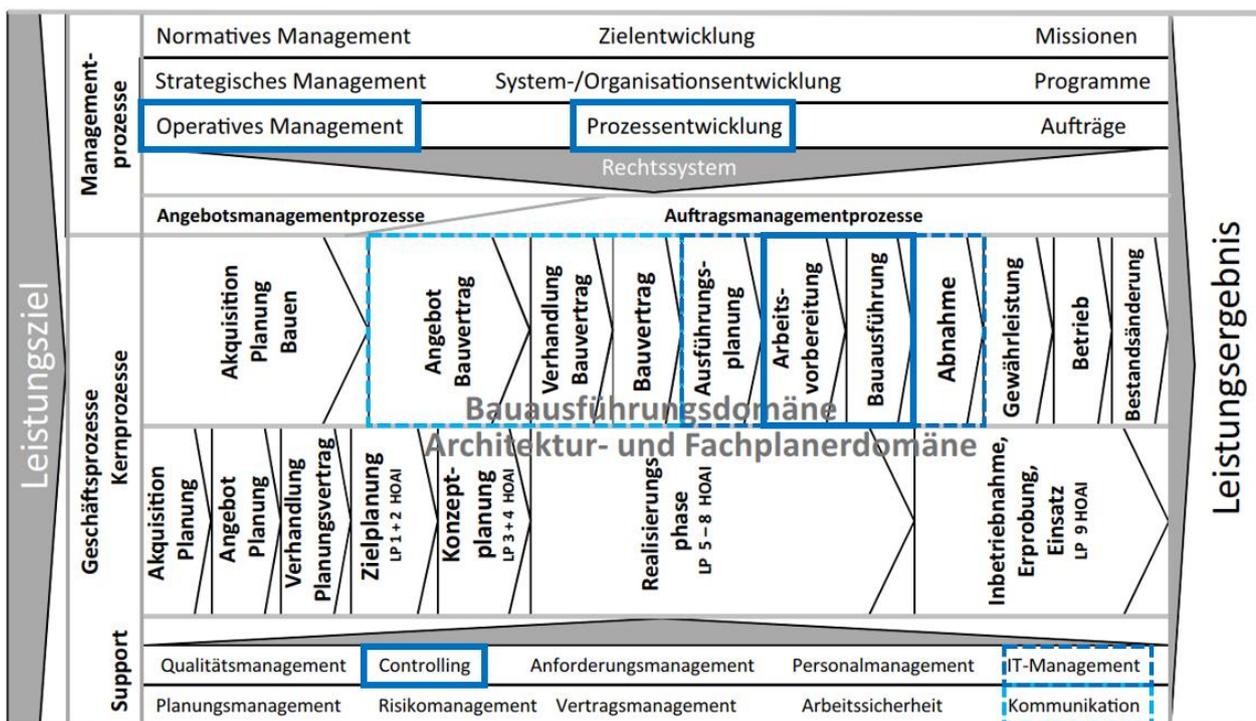
Zur Einordnung der vorliegenden Arbeit sowohl in einen theoretischen als auch in einen praktischen Bezugsrahmen und somit als Erläuterung der in Kapitel 1. aufgespannten Sphäre wird nachfolgend die Fachdisziplin des Baubetriebs und dessen wissenschaftstheoretische Einordnung beschrieben. Diesbezüglich erfolgt in Abschnitt 2.1 die inhaltliche Verortung der Fachdisziplin Baubetrieb und es wird beschrieben, welche Prozesse innerhalb der vorliegenden Arbeit untersucht werden.

Diese Arbeit setzt die Forschungsarbeit am Institut für Baubetrieb der Technischen Universität Darmstadt im Bereich der digitalen Transformation innerhalb des Bauprozessmanagements sowie der Methode des Building Information Modeling fort. Aus diesem Grund wird in Abschnitt 2.2 auf diejenigen Forschungsarbeiten des Instituts für Baubetrieb eingegangen, die für die vorliegende Arbeit einen wertvollen Beitrag leisten und auf deren Basis der Untersuchungsgegenstand für die in Abschnitt 2.3 durchgeführten empirischen Untersuchungen abgeleitet wird. Die Ergebnisse der empirischen Untersuchungen sowie der resultierende Erkenntnisgewinn wird in Abschnitt 2.4 dargestellt. Sie bilden wiederum die Basis, die Abgrenzung sowie die zentralen Anforderungen an den Untersuchungsgegenstand des in Kapitel 4. beschriebenen aktuellen Stands der internationalen Forschung, aus dem schließlich die der Arbeit zugrunde liegenden Forschungslücke abgeleitet wird

2.1. Inhaltliche Verortung der Fachdisziplin Baubetrieb

Die Bauwirtschaft bedient das Grundbedürfnis der Bevölkerung nach Wohnen und errichtet resp. verwaltet darüber hinaus die entsprechende Infrastruktur, um sowohl Reise- als auch Wirtschaftsverkehr zu ermöglichen. Dabei wird sie neben Errichtung, Erhaltung und Nutzung mit einem kontinuierlichen Wandel innerhalb der Bauwerke konfrontiert.⁵⁸

Dieser Wandel wird durch den Baubetrieb überwacht und durchgeführt. Es liegt somit im Interesse der Sache, zugehörige Prozesse⁵⁹ wissenschaftlich zu hinterfragen. Die Baubetriebswissenschaft befasst sich diesbezüglich mit bauprozessbezogenem Bauunternehmens- sowie Bauprojektmanagement. Innerhalb eines Unternehmens orientiert sich die Prozesslandschaft gemäß Abbildung 2-1 an Leistungsziel und Leistungsergebnis. Kernelement und Wertschöpfung⁶⁰ eines Bauunternehmens ist der Leistungserstellungsprozess.⁶¹ Dieser bildet als Kernprozess zusammen mit den Supportprozessen die Geschäftsprozesse innerhalb der Bauunternehmung und erhält maßgebende Richtwerte aus Managementprozessen.



Legende:

- Hauptbetrachtung
- Nebenbetrachtung
- Einflussbereich

Abbildung 2-1: Beispiel der Prozesslandkarte einer Bauorganisation⁶²

⁵⁸ Vgl. Berner, et al. 2020, S. 1.

⁵⁹ Der Begriff *Prozess* wird in Kapitel 3.1.1 auf Seite 27 erläutert

⁶⁰ Wertschöpfung beschreibt betriebswirtschaftlich die Zunahme des Wertes eines Gutes durch physische Bearbeitung oder Hinzufügen einer Dienstleistung. Vgl. Thommen 2008, S. 708.

⁶¹ Vgl. Girmscheid 2007, S. 1.

⁶² nach Motzko 2013, S. 8.

Managementprozesse geben nach MOTZKO in der Bauorganisation die normativ-strategische Ausrichtung vor und bilden somit den Rahmen des operativen Handelns.⁶³ Meist sind es kontinuierliche, repetitive und unikale Prozesse zur Führung von Unternehmen und Projekten unter anderem mit Fokus auf Controlling-Prozessen.⁶⁴

Die Geschäftsprozesse bilden innerhalb einer Bauunternehmung die Wertschöpfung ab und werden abhängig von ihrem Kundschaftsbezug in Kernprozesse und Supportprozesse eingeteilt.⁶⁵

Die Kernprozesse bildet die Wertschöpfung ab. Abhängig der jeweiligen Domäne – Bauausführungsdomäne oder Architektur und Fachplanerdomäne – werden unterschiedliche Phasen bedient.⁶⁶ Die Supportprozesse haben keinen direkten Einfluss auf die Leistungserstellung, sind jedoch für deren Überwachung oder die Unternehmensführung unverzichtbar.⁶⁷

Die in Kapitel 1.2 angesprochene Regelungsmöglichkeit bezieht sich innerhalb der Prozesslandkarte einer Bauorganisation vorwiegend innerhalb der Kernprozesse auf den Themenkomplex Arbeitsvorbereitung und Bauausführung sowie innerhalb der Supportprozesse auf das Controlling. Da innerhalb der Projektbearbeitung eine strikte Trennung aller Prozesse nur bedingt möglich ist, werden in der vorliegenden Betrachtung die Kernprozesse der Ausführungsplanung sowie der Abnahme ebenfalls in die Untersuchung einbezogen und gelten als Nebenbetrachtung. Darüber hinaus werden Auswirkungen auf die Prozesse von Angebotsbearbeitung bis Bauvertrag angesprochen, jedoch nicht detailliert betrachtet, da auch sie aufgrund einer ganzheitlichen Systematik notwendigerweise in den Einflussbereich der Untersuchung fallen. Äquivalent verhält es sich innerhalb der Supportprozesse. Die vorliegende Betrachtung bezieht im engeren Sinne das IT-Management mit ein und deutet Auswirkungen auf den Bereich der Kommunikation an. Die vorliegende Untersuchung beleuchtet innerhalb der Managementprozesse die Sphären der Prozessentwicklung und nimmt eindeutig Einfluss auf die Sphäre des operativen Managements.

⁶³ Vgl. Motzko 2013, S. 7.

⁶⁴ Vgl. Girmscheid 2014 S.XLII

⁶⁵ Vgl. Motzko 2013, S. 7.

⁶⁶ Vgl. Motzko 2013, S. 8.

⁶⁷ Vgl. Girmscheid 2014 S.XLII

2.2. Verortung innerhalb der Forschungsarbeit am Institut für Baubetrieb

Die zentralen Größen in der Produktionsleistung und die Quelle der eigentlichen Wertschöpfungen innerhalb der Prozesse des Baubetriebes sind nach MOTZKO, et al. die Leistungserstellungsprozesse.⁶⁸ Diesen wiederum zugehörige Prozesse gelten im Institut für Baubetrieb der Technischen Universität Darmstadt als zentraler Betrachtungsbereich und werden in zahlreichen Forschungsprojekten untersucht. Darunter fallen unter anderem ausgewählte Forschungsvorhaben eines Themenkomplexes bestehend aus Prozessen des zeitnahen Controllings bei Projekten im Bauwesen.⁶⁹

Die Prozesse der Bauausführung gelten nach MOTZKO & MEHR (2018) als hochgradig digital modelliert, da ihnen ein detaillierter Planungsprozess vorangeht. Somit ist ein Großteil der geplanten Umgebung räumlich und zeitlich definiert. Eine Zusammenführung mit dem jeweils aktuellen Stand der Bauausführung über künstliche autonome Systeme kann eine Annäherung der Bauausführung an den Stand der stationären Fertigung erreichen.⁷⁰

GRIEBEL (2000) gibt dem Faktor *mitarbeitende Person* im System des Controlling eine hohe Bedeutung, welcher nicht vergessen werden darf. Mit Hilfe von Daten aus einer Leistungserfassung könne nur dann eine ausreichende Steuerung der Baustelle erreicht werden, wenn die Daten der mitarbeitenden Person zum einen vertraut seien und sie zum anderen der Überzeugung sei, durch die Steuerung ein motivierendes Feedback zu erhalten. Darüber hinaus könne ein gutes Baustellencontrolling nur dann erfolgreich eingesetzt werden, wenn die notwendige Akzeptanz der Nutzenden und deren stetige Anwendung sichergestellt sei.⁷¹

BERGMANN (2010) gibt an, eine zeitnahe Bauprozessessteuerung erfordere eine zügige Auswertung der Leistungserstellungsprozesse mittels Computersystemen. Dies werde zu jenem Zeitpunkt der Untersuchung durch Insellösungen von Software und fehlenden Austauschformaten behindert. Man benötige eine Umgebung, in der möglichst viele Daten über das Bauprojekt sowie den Herstellungsprozess abgebildet würden.⁷²

Nach MEHR (2012) sei bei der Fertigung von Unikaten wie im Bauwesen eine zeitnahe Erfassung der im Herstellungsprozess ablaufenden Prozesse wünschenswert, um im Sinne der Steuerung im Bauprozess zeitnah eingreifen zu können. Die Sinnhaftigkeit der Steuerung von Teilen von Bauvorhaben sei lediglich während deren Erstehung gegeben. Beim Fehlen von Informationen zum Zeitpunkt innerhalb eines Bauprojektes, zu dem eine Entscheidung getroffen werden müsse, könnten diese nicht berücksichtigt werden. Die Frequenz der Erfassung dieser Information sei daher maßgebend.⁷³

BINDER (2014) untersucht die Prozesserfassung unter anderem in der Baulogistik bei Projekten in der Bauausführung. Diesbezüglich würde eine ereignisbasierte Steuerung baulogistischer

⁶⁸ Vgl. Motzko, et al. 2021, S. 660.

⁶⁹ Vgl. Motzko, et al. 2021, S. 660.

⁷⁰ Vgl. Motzko & Mehr 2018, S. 398.

⁷¹ Vgl. Griebel 2000, S. 208.

⁷² Vgl. Bergmann 2010, S. 3.

⁷³ Vgl. Mehr 2012, S. 2.

Prozesse mit Echtzeit-Ortungssystemen entwickelt und umgesetzt. Es bestünden jedoch noch Lücken in der Durchgängigkeit der Informationsverarbeitung. Für eine Steuerung dieser Prozesse auf Basis einer automatisierten Erfassung, Dokumentation und Kontrolle bestehe noch Forschungsbedarf.⁷⁴

Ein Teil dieser Forschung wird durch WEIL (2022) weitergeführt. Diesbezüglich wird eine kontinuierliche Überwachung von Arbeitsprozessen auf der Grundlage sensorisch erfasster Daten in Echtzeit prototypisch durchgeführt, aus der die Möglichkeit einer kurzzyklischen Kontrolle und Steuerung der überwachten Prozesse abgeleitet werden kann. Die Untersuchung wird vor dem Hintergrund der Lean Construction im schlüsselfertigen Hochbau durchgeführt. Als Resultat wird eine Steigerung der Prozess-transparenz festgestellt, durch die eine höhere Prozessqualität bei gleichzeitiger Verbesserung der individuellen Arbeitssituation des arbeitenden Menschen erreicht wird. Nach erfolgreichem Abschluss der prototypischen Umsetzung innerhalb des Forschungsprojekts, wird von der Verfasserin der Bedarf an einer baustellentauglichen Umsetzung geäußert.

Betrachtet man diese Forschungsprojekte im Kontext des Baustellencontrollings detailliert, so ist erkennbar, dass dediziert die Erfassung von Leistung innerhalb des Baustellencontrollings entweder in Form der automatisierten Identifizierung von Prozessen oder einer polysensoralen Erfassung von Leistung betrachtet wird.^{75,76,77} Ferner wird der Blick auf die Simulation und Prognose von Montageprozessen gerichtet, es erfolgt somit vornehmlich ein Blick in die Zukunft.⁷⁸ Lediglich WEIL ermöglicht eine prototypische kurzzyklische Kontrolle und Steuerung von Prozessen auf Basis sensorisch erfasster Daten.

Allen Forschungsprojekten wohnt die Gemeinsamkeit inne geringfügig Bezug auf die Verarbeitung, Auswertung und Bereitstellung von Daten resp. Informationen innerhalb des Verlaufs einer realen Projektbearbeitung im Bauwesen zu nehmen. Aus diesem Grund bilden solche verallgemeinerten Problemstellungen und Verbesserungsmöglichkeiten bei der Generierung und Verarbeitung von Informationen resp. Daten einen zentralen Aspekt der empirischen Untersuchung der vorliegenden Dissertation. Spezifischer liegt ein Auswertungsfokus auf Problemstellungen bei der täglichen Projektarbeit im Projektcontrolling. Der Auswertungsfokus liegt auf Problemstellungen und Verbesserungsmöglichkeiten bei den Nachweisen qualitativer Informationen zu den einzelnen Leistungen sowie dem Umgang mit Hürden im Bereich von Entscheidungsfindung vor dem Hintergrund der Steuerung einer Baustelle.

Alle Fragestellungen erhalten den Bezugsrahmen der technischen Weiterentwicklung, die im Zuge der digitalen Transformation erkennbar ist.

⁷⁴ Vgl. Binder 2014, S. 3.

⁷⁵ Vgl. Pflug.

⁷⁶ Vgl. Mehr.

⁷⁷ Vgl. Binder.

⁷⁸ Vgl. Bergmann.

2.3. Problemstellungen der Praxis

Um die Forschungslücke zu erschließen, sind zunächst Fragestellungen der Praxis aufzuzeigen. Hierbei bietet sich die empirische Forschung in Form einer qualitativen Erhebungstechnik an, sodass möglichst authentische Daten erhoben werden können, speziell auf die Problemstellung bei der Projektbearbeitung fokussiert.⁷⁹ Es werden einerseits eine qualitative Inhaltsanalyse als sog. Fokusgruppe und zusätzlich Expertiseinterviews durchgeführt. Diese eher anwendungsorientierten Untersuchungen bieten sich an, um im Zuge dieser wissenschaftlichen Arbeit eine praxisnahe Ermittlung von Problemstellungen im Ausführungsprojekten als sog. explorative Untersuchung nach MISOCH zu erfassen.^{80,81}

2.3.1. Unternehmensinterne empirische Untersuchung

Entsprechend der in Kapitel 1.4 dargestellten Offenlegung des Vorgehens bei der Durchführung der Fokusgruppe als Nachweis der *intersubjektiven Nachprüfbarkeit* und somit der *wissenschaftlichen Objektivität* nach POPPER, wird nachfolgend das Vorgehen bei der Durchführung der Fokusgruppe beschrieben.⁸²

Im vorliegenden Fall der Fokusgruppe handelt es sich bei den Teilnehmenden um eine sogenannte heterogene Milieugruppe. Sie zählen aufgrund ihrer Tätigkeit in demselben Berufsfeld, jedoch mit unterschiedlichen Aufgabenspektren zu dieser Form von Gruppe und ermöglichen dem Interviewverfahren relative Handlungs- und Einstellungshomogenität. Es werden bestmögliche Resultate erreicht, sofern ein ähnlicher Kenntnisstand der Teilnehmenden in einzelnen Aspekten desjenigen Untersuchungsgegenstands vorliegt, der aufgrund unterschiedlicher Prozessanteile in den Arbeitsbereichen differenziert betrachtet und mit möglichst unterschiedlicher Meinung und Erfahrung diskutiert werden kann.⁸³

Das Vorgehen bei Fokusgruppen ist in drei Hauptphasen, die Vorbereitungs-, die Durchführungs- und die Auswertungsphase unterteilt.⁸⁴ In der Vorbereitungsphase wird das Forschungsdesign festgelegt, indem der themenspezifische Rahmen abgesteckt wird, die Forschungsfragen erörtert und Problemstellungen definiert werden. Anschließend erfolgt die Festlegung der Gruppenteilnehmenden mit ihrem jeweiligen Hintergrund. Die Erstellung des Leitfadens ist der für die Steuerung der Durchführung zentrale Aspekt. Ziel des Leitfadens ist es, die Datenerhebung zu steuern. Er muss alle im Interview anzusprechenden relevanten Themen auflisten. Dabei wird festgelegt wie flexibel der Interviewende auf das Gespräch reagieren und somit die Richtung des Verlaufs steuern kann. Es sind vorformulierte Fragen mit einer möglichen, jedoch auch flexiblen Reihenfolge zu erstellen und stichwortartig Themengebieten zuzuordnen.⁸⁵ Dabei ist

⁷⁹ Vgl. Misoch 2019, S. 214.

⁸⁰ Vgl. Kaiser 2014, S. 1.

⁸¹ Vgl. Misoch 2019, S. 143.

⁸² Vgl. Popper 2010, S. 144.

⁸³ Vgl. Misoch 2019, S. 138.

⁸⁴ Vgl. Misoch 2019, S. 143.

⁸⁵ Vgl. Misoch 2019, S. 66.

die Formulierung der Fragen offen zu gestalten, um den Interviewten möglichst freie Antworten zu ermöglichen, in denen sie von ihren Erfahrungen oder dem Selbsterlernten erzählen können. Zum Leitfaden zählt ebenfalls die Festlegung eines Stimulus, über den der Verlauf des Gesprächs eröffnet und in einen dienlichen Kontext gestellt wird. Der Interviewende sollte einen gewissen Kenntnisstand über den Untersuchungsgegenstand bzw. die Fragestellungen besitzen, um den Gesprächsverlauf gezielt steuern oder an gewünschten Stellen detailliert nachfragen zu können.

In der vorliegenden Fokusgruppe besteht der Stimulus aus einer Darstellung einer innerhalb des Unternehmens durchgeführten Befragung der Mitarbeitenden zu den häufigsten Problemstellungen innerhalb der Projektbearbeitung im Bereich Ingenieurbau. Diese vorab durchgeführte Umfrage ist nicht Teil der vorliegenden Arbeit, bildet jedoch aufgrund der repräsentativen Ergebnisse eine ideale Gesprächsgrundlage für die Fokusgruppe. Bei besagter Umfrage wurden ca. 40 Mitarbeitende des Bereiches Ingenieurbau Deutschland einerseits zu häufigen Problemen bei Ingenieurbauprojekten unabhängig von digitalen Methoden befragt. Darüber hinaus wurde gezielt die Frage nach digital transformierten Prozessen für eine verbesserte Projektentwicklung gestellt. Eine umfassende Vorstellung der Umfrage wird vom Verfasser dieser Arbeit als nicht relevant erachtet. Zum Verständnis des Stimulus ist hingegen eine Zusammenfassung der Ergebnisse von Bedeutung. Nachfolgende Punkte wurden diesbezüglich als diejenigen innerhalb der Umfrage identifiziert, die durch das betreffende Bauunternehmen bearbeitet werden können, da sie in das eigene Arbeitsspektrum fallen:

- Hoher bürokratischer Aufwand
- Kommunikationsprobleme
- Mangelhafte Arbeitsvorbereitung
- Fehlender Standard bei Soll-Ist-Vergleichen
- Mangelhaftest Qualitätsmanagement

Diese Punkte ermöglichen der Fokusgruppe den Einstieg in die Problemidentifizierung und eine erste Einschätzung von Problemlösungsansätzen vor dem Hintergrund digitaler Methoden.

Im weiteren Verlauf der Fokusgruppe, spezifischer in der Durchführungsphase, wird während des Interviews ein Protokoll erstellt, um ggf. zusätzliche Information aus Mimik resp. Gestik zu erhalten. Nach Beenden der Interviews wird die Aufnahme transkribiert. Auf eine Darstellung der Transkription innerhalb der vorliegenden Arbeit wird aufgrund des großen Umfangs verzichtet.

Der Ablauf in der Auswertungsphase erfolgt in Anlehnung an das allgemeine inhaltsanalytische Ablaufmodell nach MAYRING⁸⁶ nach dem Ablaufschema in Abbildung 2-2.

⁸⁶ Vgl. Mayring 2015, S. 62.

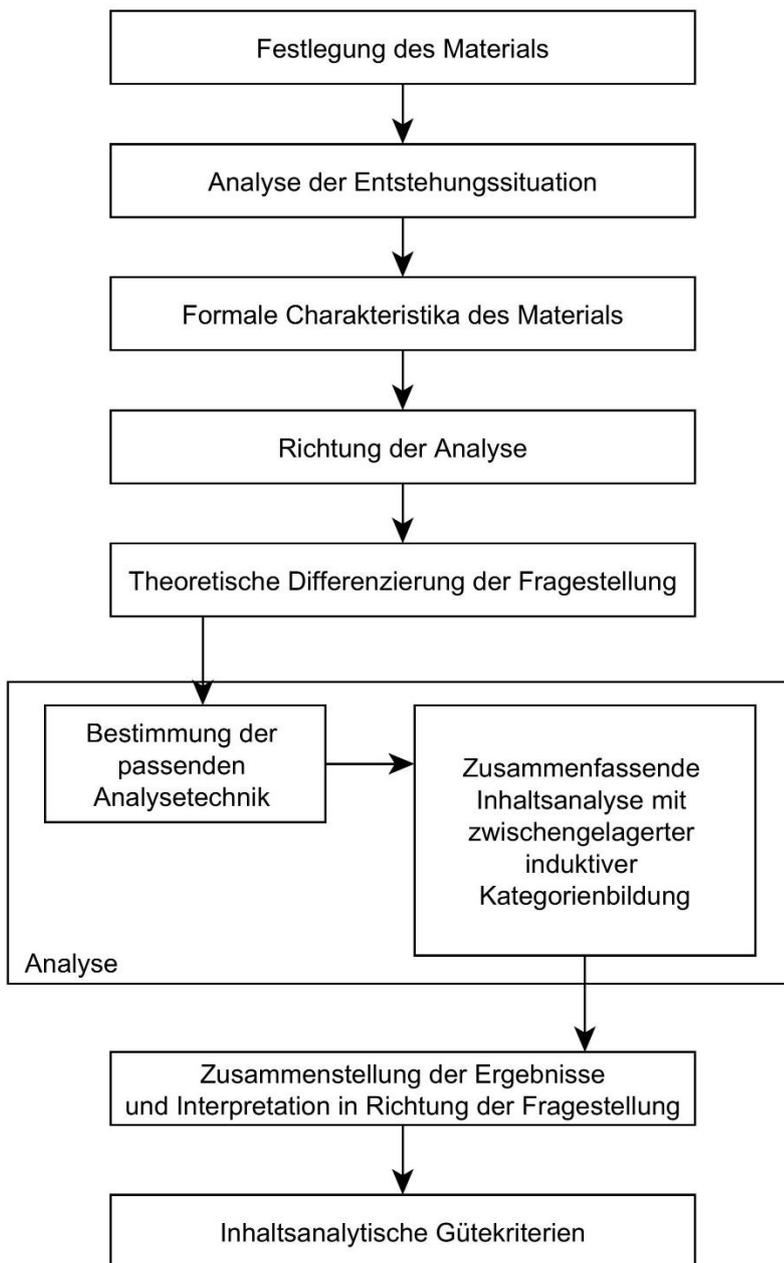


Abbildung 2-2: Inhaltsanalytischer Ablauf⁸⁷

Die entsprechenden Schritte werden nachfolgend erläutert.

Festlegung des Materials

Bei dem vorliegenden Untersuchungsmaterial handelt es sich im Wesentlichen um eine zeitlich begrenzte und thematisch orientierte Gruppeninteraktion in Form einer Fokusgruppe zur Identifikation von Problemstellungen und Hürden in der Prozesslandkarte des Projektcontrollings in

⁸⁷ Eigene Darstellung in Anlehnung an das allgemeine inhaltsanalytische Ablaufmodell nach Mayring 2015, S. 62.

der Bauausführung von Ingenieurbauprojekten. Im Vordergrund steht vor allem die Meinungsvielfalt, um ein möglichst breites Spektrum an intersubjektiven Problemstellungen innerhalb von Bauprojekten abdecken zu können.

Analyse der Entstehungssituation

Die Teilnahme an der Fokusgruppe ist freiwillig. Bei dem ausgewählten Personenkreis handelt es sich um eine heterogene Milieugruppe, bei der die Teilnehmenden in unterschiedlichen Ingenieurbauprojekten eingesetzt werden. Darüber hinaus bearbeiten sie jeweils unterschiedliche Kern- oder Supportprozesse⁸⁸ der Projekte, zum Beispiel Ausführungsplanung, Arbeitsvorbereitung, Bauausführung oder Controlling. Die jeweiligen Projekte durchlaufen zum Zeitpunkt der Fokusgruppe teils unterschiedliche Projektphasen.

Das Verfahren der semistrukturierten⁸⁹ und offenen⁹⁰ Fokusgruppe wird gewählt, um Daten aktueller Problemstellungen in den einzelnen Projekten zu erhalten, die den Rahmen dieser wissenschaftlichen Untersuchung bedingen. Ziel ist es, ein möglichst großes Spektrum an Prozessen abdecken zu können und gezielt diejenigen Prozesse herauszustellen, die bei möglichst vielen Gruppenteilnehmenden gemeinsam auftretende Problemstellungen explizit aufzeigen. Nach MISOCH stellt die Gruppeninteraktion als solche bereits eine Datenquelle dar, deren Rahmen durch aktuelle und prägnante Problemstellungen in Ausführungsprojekten im Bereich Ingenieurbau, speziell innerhalb eines ausführenden Bauunternehmens, gebildet wird.⁹¹

Formale Charakteristika des Materials

Die Fokusgruppe wird in Form einer Videokonferenz durchgeführt. Dabei sind die Teilnehmenden jeweils von ihren selbst gewählten Standorten per Videokonferenzsystem zugeschaltet. Die verwendete Software ermöglicht die automatische Aufnahme von Bild und Ton. Die Tonaufzeichnung wird im Anschluss von einem Online-Dienstleister transkribiert.⁹² Der auf diese Weise entstandene Text wird wiederum manuell aufbereitet und von Fehlinterpretationen des Algorithmus bereinigt.

⁸⁸ Die genannten Kern- und Supportprozesse beziehen sich auf die Prozesslandkarte einer Bauorganisation nach Motzko 2013, S. 8.

⁸⁹ *Semistrukturiert* bedeutet in diesem Fall, dass der Interviewer einen Leitfaden mit Fragen erstellt hat, deren Reihenfolge oder Formulierung je nach aktuellem Thema variieren kann

⁹⁰ *Offen* bedeutet in diesem Fall, dass die Gruppenteilnehmenden auf die jeweiligen Fragen frei antworten können

⁹¹ Vgl. Misoch 2019, S. 140.

⁹² Die automatisierte Transkription wird vom Dienstleister AmberScript (www.amberscript.com) durchgeführt. Folgende Transkriptionsregeln werden verwendet:

- Füllwörter werden entfernt
- Sich wiederholende Wörter werden verworfen oder angepasst
- Stotterer und Zwischenrufe werden ausgeschlossen
- Die Lesbarkeit wird verbessert, indem kleinere Grammatikfehler und Formulierungen korrigiert werden (z. B. durch Entfernen von Slang-Wörtern)

Richtung der Analyse

Durch die Fokusgruppe sollen Problemstellungen erarbeitet und diskutiert werden, die bei einem Großteil der Teilnehmenden vergleichbar ausfallen. Dabei sollen die Teilnehmenden angeregt werden, über ihre bisherigen Handlungen innerhalb der Projekte zu sprechen, gemeinsame Erfahrungen zu erörtern und auszutauschen. Die Analyse soll folglich dazu dienen, die durch den Faktor Mensch maßgeblich vorgegebene Prozessgeschwindigkeit zu beleuchten. Diesbezüglich sollen Angaben über die Generierung von Daten auf den Baustellen, deren Weiterverwendung und resultierende Entscheidungsfindungen unter anderem bei der Nutzung von Leistungsmeldungen, Nachträgen, der Abrechnung und der Nachkalkulation gesammelt werden. Dies alles dient dem übergeordneten Ziel, eine Beschleunigung der angesprochenen Prozessgeschwindigkeit mit Bezug zu einer mehrheitlich automatisierten Prozessgestaltung zu erreichen.

Theoretische Differenzierung der Fragestellung

Ziel der Untersuchung ist es, phänomenologische Beschreibungen resp. Erklärungen auf Basis einer technischen und sozialen Wirklichkeit zu erhalten und daraus mögliche soziale sowie technische Wirklichkeiten zu entwerfen resp. zu gestalten.⁹³ Den Rahmen der Fokusgruppe bildet die Thematik allgemeiner Defizite im Projektverlauf von Projekten vorwiegend in der Leistungsphase 8 im Bereich Ingenieurbau.

Daraus ergeben sich folgende Hauptfragestellungen:

Fragestellung 1 (RQ1):

Welche Schwierigkeiten treten beim Nachweis der geschuldeten Qualität von Bauwerksteilen auf der Baustelle auf?

Fragestellung 2 (RQ3):

Welche Problemstellungen treten im Allgemeinen bei der täglichen Arbeit im Projektcontrolling der Bauprojekte auf?

Fragestellung 3 (RQ3):

Wie erfolgt der Umgang mit Problemstellungen und Hürden im Bereich der Entscheidungsfindung bezüglich der Steuerung der Bauprojekte?

Fragestellung 4 (RQ4):

Welche Problemstellungen und Verbesserungsmöglichkeiten treten im Allgemeinen bei der Generierung und Verarbeitung von Informationen resp. Daten auf der Baustelle auf?

⁹³ Vgl. Girmscheid 2007, S. 74.

Analyse

Bei den Techniken qualitativer Inhaltsanalyse differenziert MAYRING drei Grundformen des Interpretierens.⁹⁴

- Zusammenfassung⁹⁵
- Explikation⁹⁶
- Strukturierung⁹⁷

Die Form der Explikation ermöglicht eine Erweiterung des Untersuchungsmaterials an einzelnen, fraglichen Textstellen um zusätzliches Material. Dies erfolgt, um das Verständnis für das Material zu vergrößern resp. die Textstelle zu erläutern. Nach Ansicht des Verfassers der vorliegenden Arbeit erzielt die Untersuchung durch Erweiterung dedizierter Textstellen jedoch nicht die gewünschten Resultate einer umfassenden, teils generalisierten Vorstellung der in dieser Arbeit gewählten Hauptfragen. Die Grundform der Strukturierung ermöglicht es, einzelne Textteile hervorzuheben und auf Basis bestimmter Ausprägungen näher zu untersuchen.

Nach MAYRING sind zwar Mischformen der dargestellten Grundformen möglich.⁹⁸ Nach Ansicht des Verfassers erscheint dies im vorliegenden Fall jedoch nicht zielführend. In Form einer zusammenfassenden Inhaltsanalyse mit zwischengelagerter induktiver Kategorienbildung kann das Material hinreichend bearbeitet und interpretiert werden. Diesbezüglich wird der transkribierte Text paraphrasiert und anschließend generalisiert. Dadurch wird an einem Großteil des Materials ein entsprechendes Abstraktionsniveau erreicht, durch das sich eine Verallgemeinerung ergibt, die die Hauptfragen hinreichend bedient. Eine Einordnung in unterschiedliche Kategorien erlaubt es, unter festgelegten Ordnungskriterien Teile des Materials herauszubilden und entsprechend der Häufigkeit des Auftretens zu gewichten.

Das Vorgehen der Analyse wird je Fragestellung RQ 1 bis 4 entsprechend Abbildung 2-3 durchgeführt. Dabei wird an dieser Stelle auf eine Darstellung der einzelnen Schritte des Ablaufmodells der zusammenfassenden Inhaltsanalyse innerhalb dieser Arbeit aufgrund des großen Umfangs verzichtet.

⁹⁴ Mayring 2015, S. 67.

⁹⁵ Ebenda: „Zusammenfassung: Ziel der Analyse ist es, das Material so zu reduzieren, dass die wesentlichen Inhalte erhalten bleiben, durch Abstraktion einen überschaubaren Corpus zu schaffen, der immer noch Abbild des Grundmaterials ist.“

⁹⁶ Ebenda: „Explikation: Ziel der Analyse ist es, zu einzelnen fraglichen Textteilen (Begriffen, Sätzen, ...) zusätzliches Material heranzutragen, das das Verständnis erweitert, das die Textstelle erläutert, erklärt, ausdeutet.“

⁹⁷ Ebenda: „Strukturierung: Ziel der Analyse ist es, bestimmte Aspekte aus dem Material herauszufiltern, unter vorher festgelegten Ordnungskriterien einen Querschnitt durch das Material zu legen oder das Material aufgrund bestimmter Kriterien einzuschätzen.“

⁹⁸ Vgl. Mayring 2015, S. 68.

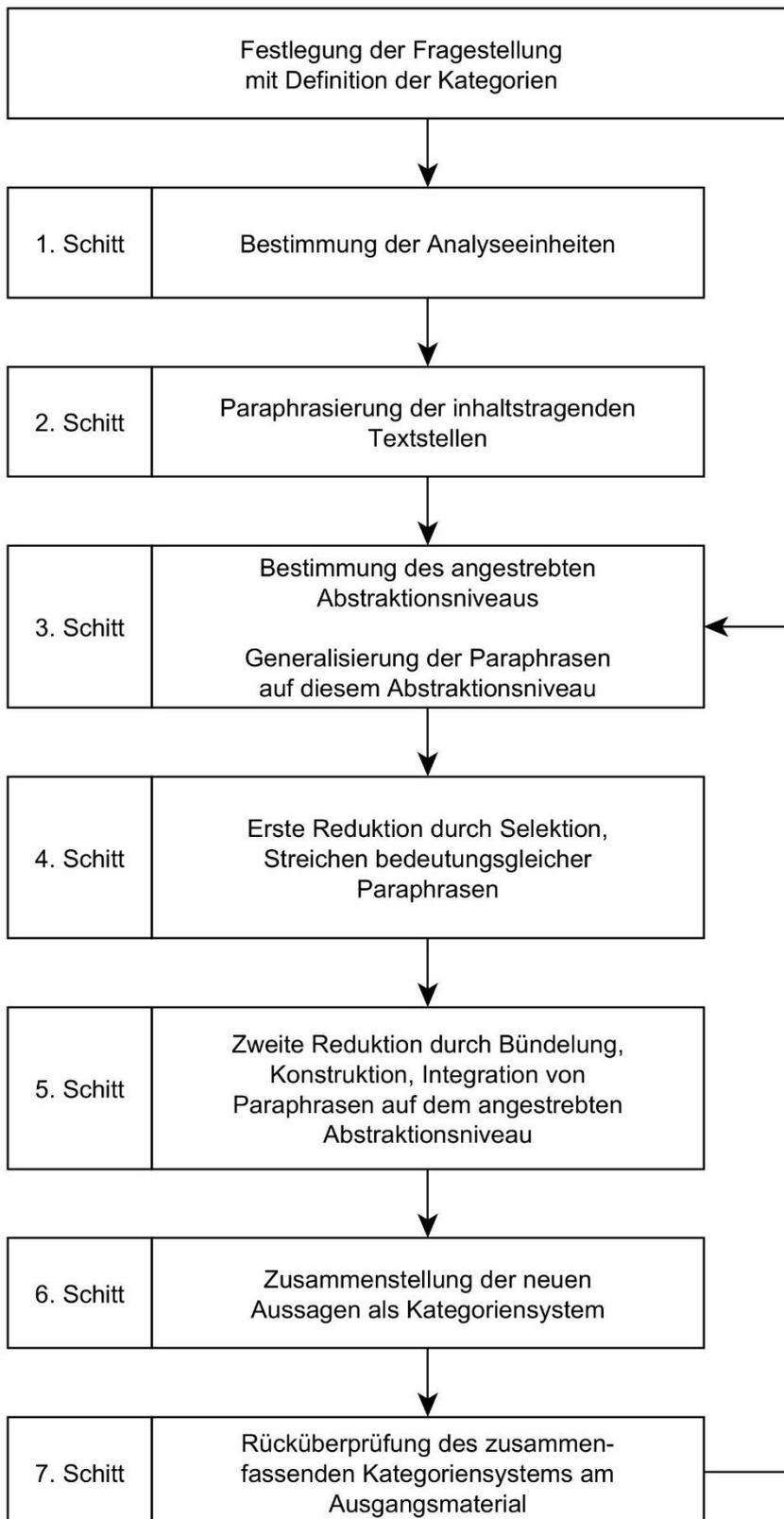


Abbildung 2-3: Zusammenfassende Inhaltsanalyse mit induktiver Kategorienbildung⁹⁹

⁹⁹ Eigene Darstellung in Anlehnung an Mayring 2015, S. 70.

Zusammenstellung der Ergebnisse und Interpretation in Richtung der Fragestellung

Die Ergebnisse der qualitativen Inhaltsanalyse sind im Anhang dargestellt. Das gewählte Abstraktionsniveau der qualitativen Inhaltsanalyse liegt im Spannungsfeld zwischen einer hohen Abstraktion, um einen ausreichenden Bezug der Ergebnisse der einzelnen Projekte untereinander herstellen zu können und einer geringen Abstraktion, um die teils recht präzisen Aussagen der Teilnehmenden inhaltlich in den Ergebnissen Beachtung schenken zu können.

Retrospektiv lässt sich eine eindeutige Trennung der Ergebnisse nach den jeweiligen Hauptfragen zwar annähernd erkennen, die Grenzen zwischen den Antworten sind jedoch fließend. Daher erscheint es dem Verfasser dieser Arbeit als zielführend, die Ergebnisse mit der bezogenen Häufigkeit aus den jeweiligen Fragestellungen zusammenzuführen und hinsichtlich der Richtung der rahmengebenden Fragestellung allgemeiner Defizite im Projektverlauf bei Ingenieurbauprojekten zu interpretieren.

Es lassen sich abschließend folgende Kernpunkte identifizieren:

- Das Projektpersonal muss sich mit zu vielen bürokratischen Themen beschäftigen, die nicht in dessen Kerngeschäft fallen.
- Die manuelle Eingabe, Pflege und Verarbeitung von Daten bedeuten einen sehr hohen zeitlichen Aufwand des Personals und führen überwiegend zu inkonsistenten bzw. mangelhaften Daten.
- Menschen sind bei der Dateneingabe eine bedeutende Fehlerquelle, sie geben nur die notwendigen Daten in die EDV-Systeme ein. Daher müssen Aufnahme resp. Eingabe automatisiert erfolgen.
- Es entstehen zu hohe Kosten für verwaltendes Personal.
- Personal muss durch technische Möglichkeiten in seiner Arbeit unterstützt werden, sodass es dem jeweiligen "Kerngeschäft" wieder nachkommen kann.
- Polysensorale Aufnahmen oder automatisierte Dateneingaben ermöglichen das Erfassen zusätzlicher Informationen in kürzerer Zeit mit geringem Informationsverlust.
- Daten sollten auf Basis einer zentralen Datenhaltung über Methoden der Künstlichen Intelligenz aufgenommen, interpretiert und verarbeitet werden.
- Ein negativer Projektverlauf wird teils zu spät erkannt, da die Informationen aus Steuerungsmechanismen ungenügend aufbereitet sind.
- Ergebnisse oder Maßnahmen aus Steuerungsgesprächen können nicht zeitnah bzw. effizient eingeleitet oder umgesetzt werden, da nicht immer alle notwendigen Informationen zeitnah aufbereitet zur Verfügung stehen. Dadurch entstehen hohe Kosten.
- Im Controlling-Prozess erkannte Probleme müssen frühestmöglich an die Ausführung weitergeleitet werden.
- Aufgrund von inkonsistenten Daten bzw. intransparenter Dateneingabe können Prognosen nicht sinnvoll erstellt werden.
- Entscheidungsprozesse basieren häufig auf unzureichend aufbereiteten Daten und dauern in der Umsetzung zu lange, als dass sie für eine adäquate Projektsteuerung effizient wirken könnten.

Inhaltsanalytische Güteprüfung

Die Güteprüfung der Ergebnisse aus der qualitativen Forschung wird nach MAYRING durch die Verfahrensdokumentation, Nähe zum Untersuchungsgegenstand und Regelgeleitetheit erreicht.¹⁰⁰

Die Dokumentation des Vorgehens sowie die Nähe zum Untersuchungsgegenstand können innerhalb dieses Kapitels 2.3.1 nachvollzogen werden. Die Regelgeleitetheit erfolgt durch die Befolgung des systematischen Vorgehens nach MAYRING entsprechend Abbildung 2-2: Inhaltsanalytischer Ablauf. Dabei wird der Gesamtprozess in Einzelschritte aufgeteilt und beschrieben. Er stellt somit die gewählte Methode dar.

2.3.2. Unternehmensübergreifende empirische Untersuchung

Die vorab genannten Ergebnisse aus der Analyse der Fokusgruppe spiegeln die Betrachtung einer Personengruppe eines einzelnen Unternehmens wieder. Obschon diese Darstellung aus Sicht des Verfassers dieser Arbeit auf eine Vielzahl an Projekten in unterschiedlichen Zweigen der Baubranche transferiert werden kann, sind für eine explorative Untersuchung Informationen aus weiteren Unternehmen in die Betrachtung einzubeziehen. Dies erfolgt in der Durchführung von Expertiseinterviews.¹⁰¹ Daher werden im Folgenden ausschließlich die Ergebnisse der Auswertung dargestellt.

Innerhalb der Expertiseinterviews wurde der Implementierungsstand der Methode Building Information Modeling im Tief- und Ingenieurbau in mehreren deutschen Bauunternehmen sowie ausgewählten Unternehmen für Softwareentwicklung erfasst. Allgemein wurden Probleme und Hindernisse ermittelt, jedoch auch Potenziale und Möglichkeiten aufgezeigt, die den Einsatz dieser Methode innerhalb der Projektarbeit im Bauwesen noch effizienter gestalten könnten. Neben Ergebnissen, die sich überwiegend auf die Verwendung der Methode BIM innerhalb der Projekte beziehen, werden Informationen von einzelnen Interviewpartnerinnen und -partnern dargestellt, die sich auf allgemeine Hürden und Schwierigkeiten von Projekten oder auch von Unternehmen beziehen. Die Kernergebnisse werden nachfolgend aufgezeigt.

36 % der Expertinnen und Experten geben an, Steuerungsprozesse würden häufig innerhalb von Projekten bis dato manuell so durchgeführt, wie es in den letzten Jahrzehnten erfolgt sei.¹⁰² Es gebe keine aktive Steuerung innerhalb der Projekte, vielmehr werde auf den Baustellen auf das jeweilige Tagesgeschehen reagiert. Es fehle derzeit eine frühzeitige und vorausschauende Koordination, die nachfolgende Prozesse mit in die Entscheidungsprozess einbeziehe. Auftretende Probleme könnten auf diese Weise schnellstmöglich bearbeitet oder bestenfalls umgangen werden. Es besteht jedoch Einigkeit aller Expertinnen und Experten über die Notwendigkeit der Einbindung der Methode BIM in die Projektbearbeitung. In manchen Fällen ermögliche bereits

¹⁰⁰ Vgl. Mayring 2015, S. 125.

¹⁰¹ Vgl. Bark / Kosel 2021.

¹⁰² Vgl. Bark / Kosel 2021, S. 16.

die visuelle Komponente der Modelle eine vereinfachte Interpretation des Entscheidungsgegenstandes. Im bestmöglichen Fall seien Folgeprozesse erkennbar und die Auswirkungen einzelner Möglichkeiten könnten als Entscheidungsgrundlage nahtlos in Entscheidungsprozesse einbezogen werden. Entscheidungen könnten somit direkt an das Bau-Soll resp. an das Modell geknüpft werden.¹⁰³ Zum aktuellen Zeitpunkt sei dies allerdings nur rudimentär möglich.¹⁰⁴

Einzelne Expertinnen und Experten merken an, für eine Bearbeitung und Nutzung von BIM-Modellen in Projekten im Bauwesen bedarf es einer entsprechenden Qualifikation der Anwender und Anwenderinnen, die aktuell noch nicht vorhanden sei.¹⁰⁵ Ferner bestehe eine hohe Abhängigkeit von denjenigen Personen, die eine entsprechende Qualifikation besitzen. Sie verantworteten die Eingabe und Anbindung der Daten in die EDV-Systeme, da noch keine kontinuierlichen standardisierten und dokumentierten Arbeitsprozesse etabliert wurden. Folglich entspreche die Prozess- und Ergebniskonsistenz der Eingabe und somit der Integrität der jeweiligen Personen innerhalb der Projekte.¹⁰⁶

Für eine Reduzierung der Abhängigkeit von diesen Personen, ist die Erhöhung des Automatisierungsgrades von Prozessen notwendig. Diese wäre hilfreich, um Ressourcen zu sparen, die an anderer Stelle sinnvoller einzusetzen sind. Einzelne Expertinnen und Experten sind der Meinung, Automatisierung führe bei wenig anspruchsvollen, jedoch manuell aufwändigen Prozessen zu einer Entlastung des Personals. Diese automatisierten Prozesse müssten indes stets überprüft werden. Darüber hinaus sind sich die Expertinnen und Experten einig, automatisierte Prozesse werden die Menschen nicht ersetzen, sie werden sie vielmehr dahingehend unterstützen, die Qualität ihrer Arbeit zu erhöhen.¹⁰⁷

Für eine fehlerreduzierte Projektbearbeitung ist nach Ansicht mehrerer Expertinnen und Experten eine zentrale Datenhaltung unabdingbar. Nach ihrer Erfahrung erfolge bis dato lediglich eine unzureichende Kommunikation innerhalb der Projekte auf einer verteilten Datenbasis. Dabei träten uneinheitliche Planungsstände auf und es werde ein beachtlicher Zeitaufwand investiert, um die Aktualität der jeweiligen Pläne zu verifizieren.¹⁰⁸

Neben den auftretenden Problemstellungen und Hürden werden ebenso Potenziale der Verwendung der Methode BIM sowie der digitalen Transformation im Allgemeinen aufgezeigt. In dieser Hinsicht gelten digitale Prozesse als Investment in die Zukunft, wonach Mehrwert erst durch Investitionen in Personen und den Aufbau von Wissen sowie einen flächendeckenden Einsatz der Methode generiert werden könne.¹⁰⁹ Darüber hinaus werden Empfehlungen ausgesprochen, wonach Prozesse durch eine Verminderung der manuellen Eingabe von Daten in die EDV-Systeme inklusive automatisierter Ablage, Pflege und maschineller Interpretation effektiver abgewickelt werden können. Einbezogen werden sollte darin ebenso die Möglichkeit sensorischer

¹⁰³ Vgl. Bark / Kosel 2021, S. 26.

¹⁰⁴ Vgl. Bark / Kosel 2021, S. 26.

¹⁰⁵ Vgl. Bark / Kosel 2021, S. 26.

¹⁰⁶ Vgl. Bark / Kosel 2021, S. 42.

¹⁰⁷ Vgl. Bark / Kosel 2021, S. 49.

¹⁰⁸ Vgl. Bark / Kosel 2021, S. 38.

¹⁰⁹ Vgl. Bark / Kosel 2021, S. 44.

oder polysensoraler Erfassung von Informationen.¹¹⁰ Dies führt zu einer durchgängigen Vernetzung der einzelnen Prozesse im Projektcontrolling und einer Nutzung von Auswertungsalgorithmen zur Aufbereitung der Daten wie Interpretation und Auswertung für Prognosen und Entscheidungsprozesse oder ganzheitlich für eine adäquate Projektsteuerung.¹¹¹

¹¹⁰ Vgl. Bark / Kosel 2021, S. 15.

¹¹¹ Vgl. Bark / Kosel 2021, S. 26.

2.4. Erkenntnisgewinn

Aus den empirischen Untersuchungen und den dort vorgebrachten Thesen lassen sich gemeinsame zentrale Anforderungen zur Ermittlung der Forschungslücke ableiten. Die Aussage eines Schichtbauleiters eines Infrastrukturprojektes mit einem Volumen von ca. 260 Mio. € sticht jedoch hervor:

„Ich habe auf meiner letzten Baustelle am Ende bei 4.000 Fotos in Excel-Tabellen zugeordnet, was auf dem Foto jeweils zu sehen ist. Mehrere Wochen lang [sic].“¹¹²

Der Schichtbauleiter beschreibt einen aktuellen Arbeitsprozess in der Projektarbeit, wie er bei einigen Projekten in der Bauindustrie in Deutschland im Jahr 2021 auf eine ähnliche, wenig automatisierte und manuell aufwändige Weise erfolgt.¹¹³

Es lässt sich im Allgemeinen der Bedarf an Automatisierung in der Generierung resp. Weiterleitung von Informationen innerhalb der Bauprojektorganisation erkennen. Grund dafür ist ein bis dato hoher bürokratischer Aufwand als Begleiterscheinung der Projektbearbeitung und somit ein hoher manueller Aufwand für Arbeit, die nicht das Kerngeschäft der Projektbeteiligten bildet. Dieser Aufwand besteht zu großen Teilen in der manuellen Eingabe, Pflege und Verarbeitung von Daten und führt zu einem hohen Aufwand für nicht wertschöpfende Tätigkeiten. Eine Begleiterscheinung ist die niedrige Konsistenz der manuell eingegebenen Daten. Aufgrund dieses Vorgehens lässt sich der Mensch als eine bedeutende Fehlerquelle bei der Dateneingabe identifizieren. Innerhalb der Expertiseinterviews wird die These vorgebracht, diese Problemstellung werde durch eine Steigerung des Automatisierungsgrades der Prozesse im Projektgeschäft gemindert, das Personal könne sich wieder auf die jeweiligen Kernaufgaben konzentrieren. Um dies zu gewährleisten, müssen Prozesse der Erfassung, Verarbeitung und Interpretation von Daten standardisiert und automatisiert werden.

Wie bereits erwähnt, wird der Prozess des Projekt-Controllings als zentraler betroffener Bereich innerhalb des Projektablaufes identifiziert. Dort können Ergebnisse mit der größten Reichweite erzielt werden. Als Problem gilt beispielsweise, dass Ergebnisse oder Maßnahmen aus Steuerungsgesprächen nicht zeitnah bzw. effizient eingeleitet oder umgesetzt werden können, da nicht immer alle notwendigen Informationen zeitnah aufbereitet werden und zur Verfügung stehen. Bis dato wird ein Großteil von Steuerungsprozessen manuell durchgeführt und erfolgt somit derartig zeitverzögert, dass zu treffende Entscheidungen teils bereits überholt sind. Darüber hinaus basieren Entscheidungsprozesse häufig auf unzureichend aufbereiteten Daten und nehmen in der Umsetzung zu viel Zeit ein, als dass sie für eine adäquate Projektsteuerung effizient wirken könnten. Infolgedessen fehlt derzeit eine frühzeitige und vorausschauende Koordination, die anschließende Prozesse in der Bauausführung mit in die Entscheidungsprozess einbezieht.

¹¹² Teilnehmende der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Fokusgruppe. Der Urheber möchte nicht genannt werden.

¹¹³ Vgl. Bark / Kosel 2021, S. 49; Statistisches Bundesamt (Destatis).

Um solche Problemstellungen innerhalb des Projektcontrollings zu lösen, kann bspw. eine automatisierte Erfassung von Daten die Bereitstellungszeit von notwendigen Informationen für Steuerungs- oder Entscheidungsprozesse verkürzen. Darüber hinaus kann eine visuelle Darstellung des Leistungsstandes in Echtzeit für eine Entscheidungsgrundlage von hoher Bedeutung sein.

Den vorangehenden Überlegungen liegt die Notwendigkeit einer zentralen Datenhaltung als *Single Source of Information* (SSoI) zugrunde. Dies ist eine Datenhaltung, die eine Vernetzung sensoraler oder polysensoraler Erfassungssysteme in Echtzeit ermöglichen kann. Man kommt somit einer ganzheitlichen Abbildung des komplexen sozio-ökonomisch-technischen Systems *Bauen* näher, das nach MOTZKO aktuell nur in Teilaspekten softwaretechnisch abgebildet wird.¹¹⁴

Die vorgebrachten Anforderungen lassen den Verfasser dieser Arbeit darauf schließen, den aktuellen Stand des Controllings innerhalb eines Bauunternehmens näher zu betrachten. Darüber hinaus wird der sozio-technische Bezugsrahmen in Form des aktuellen Stands der Forschung bezüglich der digitalen Transformation im Allgemeinen sowie unter anderem zugehörigen Technologiekomplexen wie Industrie 4.0 oder Artefakten wie Cyber-Physischen Systemen untersucht.

Abschließend kann die Erarbeitung der Ergebnisse beider empirischer Untersuchungen entsprechend der Modelle der Realwissenschaften als theoriegeleitet, begründet und empirisch abgesichert festgestellt werden.¹¹⁵ Die Erzeugung deskriptiver und explikativer Erkenntnisse erfolgt über soziale Systeme, welche ebenso durch eine Baustelle repräsentiert werden. Darüber hinaus wird festgestellt, die Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen der Fokusgruppe sowie der Expertiseinterviews sind induktiv und genügen somit dem wissenschaftlichen Ansatz für die Ingenieurwissenschaften nach GIRMSCHIED als eine Erkundung korrelativer Beziehung zwischen Untersuchungen und somit als empirisch-induktives Vorgehen.¹¹⁶ Die Prüfung der Güte wird durch konsequente Befolgung des systematischen Forschungsprozesses nach Abbildung 1-4: Ablauf der Forschungsmethode erreicht.¹¹⁷

¹¹⁴ Vgl. Motzko, et al., S. 85.

¹¹⁵ Vgl. Girmscheid 2007, S. 71.

¹¹⁶ Vgl. Girmscheid 2007, S. 103.

¹¹⁷ Vgl. Girmscheid 2007, S. 170.

3. Controlling als zentrales Managementsystem

Kernthematik der vorliegenden Arbeit ist das Bauprojekt-Controlling resp. zugehörige Themenbereiche. Für ein vertieftes Verständnis dieses Themenkomplexes, wird vorab eine grundlegende Einführung in den Komplex der Kybernetik gegeben, in der eine systemische Denkweise etabliert ist, die den allgemeinen Rahmen des Controlling-Aspekts umfasst. Diesbezüglich wird eine zirkuläre Darstellung der genannten Denkweise vorgestellt, aus der die Grundlagen für Controllingsysteme abgeleitet werden. Im Anschluss werden grundlegende Begrifflichkeiten des Controllings erläutert und es wird die Systematik von Steuerung und Regelung innerhalb von Systemen im Allgemeinen erklärt. Dies führt in die Grundlagen des Bauprojekt-Controllings über, wonach die zugehörige Art der Mehrebenensteuerung sowie die Kernaufgaben des Bauprojekt-Controllings innerhalb unterschiedlicher Phasen der Bauausführung erläutert werden. Den Abschluss bilden die Durchführungs- und Dispositionssteuerung, die den grundlegenden Rahmen der Umsetzung innerhalb des Realisierbarkeitstests der vorliegenden Arbeit bilden.

3.1. Herleitung aus dem Themenkomplex der Kybernetik

Ein wesentlicher Aspekt zum Verständnis von Prozessen des Controllings, ferner eines ganzheitlichen Controlling-Systems ist es, sich des gesamtheitlichen Charakters der Systematik der Kybernetik bewusst zu sein. KÜPPERS beschreibt die Grundlage der Kybernetik als eine Kommunikationssystematik mit „Kommunikation ist alles! Ohne Kommunikation ist alles nichts.“¹¹⁸ Vor diesem Hintergrund lässt sich somit nur bedingt eine direkte wissenschaftstheoretische Zuordnung erreichen. Vielmehr gilt ein übergeordneter und interdisziplinärer Zusammenhang. So beschreibt ANSCHÜTZ die Kybernetik als keine Einzelwissenschaft, sie sei eher eine übergreifende Idee über sehr viele, wenn nicht alle Wissenschaften.¹¹⁹ Daher wird sie wiederum als Metawissenschaft bezeichnet, die Fortschritte in natur-, ingenieur- und sozialwissenschaftlichen Einzel- bzw. Fachdisziplinen beisteuert.¹²⁰

Kernthematik der Kybernetik ist eine Art der Vernetzung, durch die eine allumfassende Kommunikation erreicht wird. Eine solche Vorstellung bezieht notwendigerweise einen umfassenden Informationsaustausch mit ein, der innerhalb der Kybernetik als Rückkopplung bezeichnet wird und in vielen Anwendungsbereichen mit zur Basis aller kybernetischer Regelungssysteme gehört.¹²¹ Sie ist somit das zentrale Merkmal kommunikativer Prozesse, ohne die eine Lösungsfindung in einer Kommunikation nicht stattfinden kann.¹²²

Betrachtet man die Kybernetik, speziell die Rückkopplung vor einem technischen Hintergrund, so findet eine Anwendung dieser zeitnahen Informationsverarbeitung in der Reduzierung der Komplexität von Aufgaben unter anderem durch Wenn-Dann-Kausalketten statt. Kurzfristig und

¹¹⁸ Vgl. Küppers 2019 S. VI

¹¹⁹ Vgl. Anschütz 1974, S. 9.

¹²⁰ Vgl. Küppers 2019, S. 9.

¹²¹ Vgl. Küppers 2019, S. 12.

¹²² Vgl. Küppers S.VII

in geringem Umfang führt diese Vorgehensweise zu einem Erfolg, vor allem hinsichtlich technischer Themen. Dabei werden jedoch teils erhebliche Rahmenbedingungen ausgeblendet. Besteht ein derart komplexes System, dessen Reduzierung für die Findung einer Lösung nicht entsprechenden reduziert werden kann, so ist das Ergebnis mangelhaft.¹²³

Eine Adaption kybernetischer Systeme auf eine technische Systematik wird durch den Begriff *Industrie 4.0*¹²⁴ repräsentiert. Oberes Ziel ist diesbezüglich eine ganzheitliche Erreichung der kommunikativen Vernetzung von Daten und Informationen. Diese Erreichung liegt allerdings bis dato noch in weiter Ferne.¹²⁵ Für die vorliegende Arbeit bildet der Themenbereich der Industrie 4.0 einen wichtigen Bezugsrahmen, da dort verwendete technischen sowie prozessualen Komponenten zur Lösungsfindung der Forschungsfragen beitragen.

Das in der Kybernetik inbegriffene Kommunikationsprinzip der Rückkopplung ist eng mit der Prozessgestaltung der Selbstorganisation innerhalb der Industrie 4.0 verbunden.¹²⁶ Es lässt eine Systematik einer zirkulären Anordnung zur Erfassung und zum Verstehen von komplexen Systemen gemäß Abbildung 3-1 ableiten und bildet die Grundlage zum Verstehen selbstregulierender Systeme.

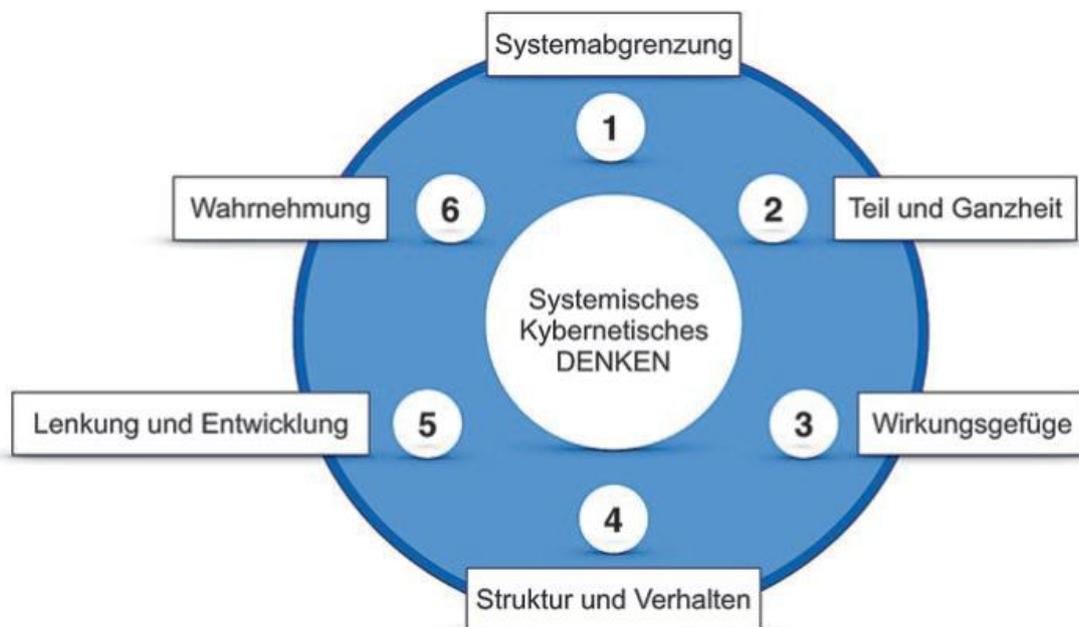


Abbildung 3-1: Systemisches und kybernetisches Denken in zirkulärer Darstellung¹²⁷

¹²³ ebenda

¹²⁴ In Kapitel 4.1 wird näher auf Industrie 4.0 eingegangen

¹²⁵ Vgl. Küppers 2019 S. VII

¹²⁶ Vgl. Küppers 2019, S. 26.

¹²⁷ Vgl. Küppers 2019, S. 26 in Anlehnung an Probst 1987, S. 26.

Schritt 1 ist die Systemabgrenzung. Es wird geklärt, welches System betrachtet wird und wo dessen Grenzen liegen. Darüber hinaus muss unter anderem erfasst werden, welche Probleme vorhanden sind, welche Prozesse stattfinden, etc.¹²⁸

Schritt 2: Teil und Gesamtheit beschreibt die Modellierung sowie die Untersuchung des Systems. Es ist festzulegen, welche Verknüpfung innerhalb der einzelnen Teile oder Komponenten des Systems vorhanden sind und wie diese interagieren. Darüber hinaus sind zentrale Fragestellung zu Verhaltensmöglichkeiten und zur Lenkung des Systems zu bedenken.¹²⁹

Schritt 3 betrifft das Wirkungsgefüge. Diesbezüglich ist zu erfassen, welche Systeme innerhalb des betrachteten Themenkomplex vorhanden sind und wie diese miteinander in Verbindung stehen. Dabei ist nicht ausschließlich der aktuelle Zustand eines Systems zu betrachten, viel mehr sollte man sich der zeitlichen Abläufe und der Interdependenzen der unterschiedlichen Systeme untereinander bewusst werden.¹³⁰

Unter Schritt 4 Struktur und Verhalten wird ein organisatorisches Gefüge etabliert, das dem betrachteten System eine Ordnung zuweist oder die Unordnung fernhält. Diesbezüglich ist die zentrale Frage zu klären, welche Strukturen das Verhalten des Systems bestimmen und wie diese innerhalb des Systems ggf. über Muster abgebildet werden können.¹³¹

Schritt 5 Lenkung und Entwicklung beschreibt die Errichtung von Lenkungsmodellen für bestimmte Systeme oder Situationen. Für ein breites Spektrum und entsprechend der Komplexität der betrachteten Systeme, kann Wissen aus unterschiedlichen Lenkungsmechanismen aus verschiedenen Disziplinen einbezogen werden. Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang, dass Abweichungen linearer Kausalitätsvorstellungen hin zu kreisförmigen Kausalitäten oder gar zu Netzwerken, auch als Regelkreise (RK) bezeichnet werden.¹³²

Schritt 6 bildet die Wahrnehmung. Oberes Prinzip der Wahrnehmung ist die Erkenntnis, Realität oder reale Probleme könnten nicht eindeutig gewissen Disziplinen zugeordnet werden oder komplexe Situationen könnten nicht so gestaltet oder gelenkt werden, dass sie ausschließlich von Expertinnen und Experten einzelner Fachdisziplinen lösbar sind.¹³³

Auf Basis dieser zirkulären Darstellung von systemischem und kybernetischem Denken und dem Korrelationsgrundsatz der Vernetzung von Systemen, erfolgt in Kapitel 4. eine Betrachtung von technischen und sozio-technischen Systemen als Bezugsrahmen für die Modellgestaltung der vorliegenden Arbeit. Es wird diesbezüglich auf Kernthemen von Industrie 4.0 eingegangen und dort verwendete Technologien zur Problemanalyse und zur Problemlösung herangezogen, auftretende Problemstellung und daran gekoppelte Prozesse werden identifiziert. Vorab wird jedoch ab Kapitel 3.1.1 gemäß Schritt 3 des systemischen und kybernetischen Denkens geprüft, welche Systeme innerhalb des übergeordneten Managementsystem vorhanden sind, welches

¹²⁸ Vgl. Küppers 2019, S. 27.

¹²⁹ ebenda

¹³⁰ Küppers 2019, S. 28.

¹³¹ Küppers 2019, S. 30.

¹³² Küppers 2019, S. 31.

¹³³ Küppers 2019, S. 32.

Wirkungsgefüge gebildet wird und welche Muster identifiziert werden können. Grundlegend bilden somit die in Kapitel 3.1.2 beschriebenen Prinzipien von Steuerung und Regelung die Grundlagen für die in der vorliegenden Arbeit entwickelte Regelungsmöglichkeit, die zu einer Beschleunigung der durch den Menschen vorgegebenen Prozessgeschwindigkeit innerhalb von Bauprojekten führen soll.

3.1.1. Prozesse

Ein Begriff, der unter anderem im Bauwesen häufig Anwendung findet, darüber hinaus auch als zentrale Begrifflichkeit innerhalb der Führung und Steuerung von Unternehmen gilt, ist der *Prozess*.¹³⁴ Das DEUTSCHEN INSTITUT FÜR NORMUNG definiert Prozesse als einen „Satz von in Wechselbeziehung oder Wechselwirkung stehenden Tätigkeiten, der Eingaben in Ergebnisse umwandelt“.¹³⁵ Darüber hinaus stellt ein Prozess eine inhaltlich abgeschlossene, zeitliche und sachlogische Folge von Aktivitäten dar, die zur Bearbeitung eines Objektes notwendig sind.¹³⁶ Objekte können hierbei vor dem Hintergrund der Bauwirtschaft als Planungsleistungen, Bauleistungen oder Baudienstleistungen ausgelegt werden. In der Informationstechnik (IT) stellt ein Prozess eine konkrete Instanziierung eines Programmes zu seiner Ausführung resp. Laufzeit innerhalb eines Rechnersystems.¹³⁷

Im Kern stellen diese beiden Begriffe einen Ablauf von definierten Arbeitsschritten in unterschiedlichen Sphären dar. Daher werden innerhalb der vorliegenden Arbeit folgende Bezeichnungen für die Begrifflichkeit der Prozesse verwendet. Der Begriff Bauprozess stellt einen Prozess in der Sphäre der Bauindustrie dar und umfasst die vorab angesprochenen Leistungen wie Planungsleistung, Baulistung oder Baudienstleistung. Der Begriff Prozess als solcher beinhaltet hingegen über die vorab genannte Sphäre der IT und die dort inbegriffene Abfolge von Arbeitsschritten innerhalb eines Rechnersystems hinaus ebenso Arbeitsschritte, die rechner-systemübergreifend ablaufen und ebenso menschliches Handeln oder Entscheidungstreffen mit einbeziehen.

Als Unterpunkt von Prozessen gilt ein Projekt als ein einmaliger „Prozess, der aus einem Satz von abgestimmten und gelenkten Tätigkeiten besteht und durchgeführt wird, um ein Ziel zu erreichen, das spezifische Anforderungen erfüllt, wobei Zeit-, Kosten- und Ressourcenbeschränkungen eingeschlossen sind“.¹³⁸ Somit stellen Zeit, Kosten und Ressourcen Rahmenbedingungen derjenigen Ziele dar, die zu erreichen sind. Diesbezüglich sind somit Voraussetzungen zu schaffen, die eine stetige Beobachtung der genannten Rahmenbedingungen ermöglichen.

¹³⁴ Vgl. Motzko 2013, S. 4.

¹³⁵ Deutsches Institut für Normung, S. 23.

¹³⁶ Vgl. Becker & Kahn 2005.

¹³⁷ Vgl. Fleischmann, et al. 2018.

¹³⁸ Deutsches Institut für Normung, S. 24.

3.1.2. Steuerung und Regelung in Systemen

Die Bauausführung kann, wie auch die gesamte Bauorganisation als solche, in Form eines Systems betrachtet werden. Um nun das Funktionsprinzip dieses Systems zu verstehen, ist es notwendig dessen Kontext zu betrachten.

Allgemein werden Systeme als eine „geordnete Gesamtheit von materiellen oder geistigen Objekten“¹³⁹ dargestellt. Betrachtet man folglich die Bauausführung als ein solches, so verfolgt diese Gesamtheit ein bekanntes Ziel, dessen Erreichung mit oder entgegen aller Einwirkungen umgesetzt werden muss. Eine derartig spezielle Art von System ist in der Kybernetik zu finden. Dort ist das wichtigste Merkmal der sog. materiellen dynamischen Systeme ihre relative „Beständigkeit gegenüber Einwirkungen aus der Umgebung [...]“¹⁴⁰ Das einfachste dieser Systeme wird durch einen einfachen Regelkreis ausgewiesen. Dieser ist wiederum charakterisiert „als ein geschlossener Wirkungsablauf, der sich, beeinflusst durch äußere Störgrößen, dynamisch auf ein bestimmtes Ziel, das durch die Führungsgröße gegeben ist, zubewegt.“¹⁴¹ Liegt ein offener Wirkungsablauf bei einem System vor, was sich durch hintereinandergeschaltete Elemente charakterisiert, so liegt eine *Steuerung* vor.¹⁴² In einer Wechselwirkung gilt für dynamische Systeme die Voraussetzung der Steuerbarkeit sowie der Beobachtbarkeit.¹⁴³ Ist eine Beobachtung nicht gewährleistet, so kann keine Steuerung des Systems erfolgen. Hierbei können einzelne Prozesse zu einem Verbund zusammengeführt werden, sofern sich Kennzahlen aus diesem Verbund ableiten lassen, die wiederum eine zeitnahe Beobachtung und einen resultierenden Vergleich ermöglichen. Als Voraussetzung für die Beobachtung dynamischer Systeme wird die Verwertbarkeit der beobachteten Informationen vorausgesetzt.

Vor dem Hintergrund einer technischen Sphäre kann auf Basis der DIN IEC 60050-351 eine differenziertere Betrachtung von *Steuerung* und *Regelung* erfolgen.

Steuern ist ein „Vorgang in einem System, bei dem eine oder mehrere variable Größen als Eingangsgrößen andere variable Größen als Ausgangsgrößen aufgrund der dem System eigentümlichen Gesetzmäßigkeiten beeinflussen“.¹⁴⁴ Eine Übersicht ist in Abbildung 3-2 dargestellt. Eine Steuerung ist die zielgerichtete Beeinflussung eines dynamischen Systems.¹⁴⁵ Dabei erhält die Steuereinrichtung keine rückgekoppelten Informationen über die Ergebnisse der Steuerung. Der zu steuernde Output kann somit nur unter expliziten Voraussetzungen auf die Sollgröße eingestellt werden. Die zugehörige entscheidende Person kennt die Reaktion des Systems auf die Stell- und Störgrößen nur bedingt. Die Störgrößen selbst sind in der Realität oft ebenfalls nicht bekannt oder nicht kontrollierbar.

¹³⁹ Klaus & Liebscher 1979, S. 800–816.

¹⁴⁰ ebenda

¹⁴¹ Küppers 2019, S. 41.

¹⁴² ebenda

¹⁴³ Vgl. Walter 2019, S. 37.

¹⁴⁴ DIN IEC 60050-351 2014, S. 137.

¹⁴⁵ Vgl. Lunze 2020, S. 2.

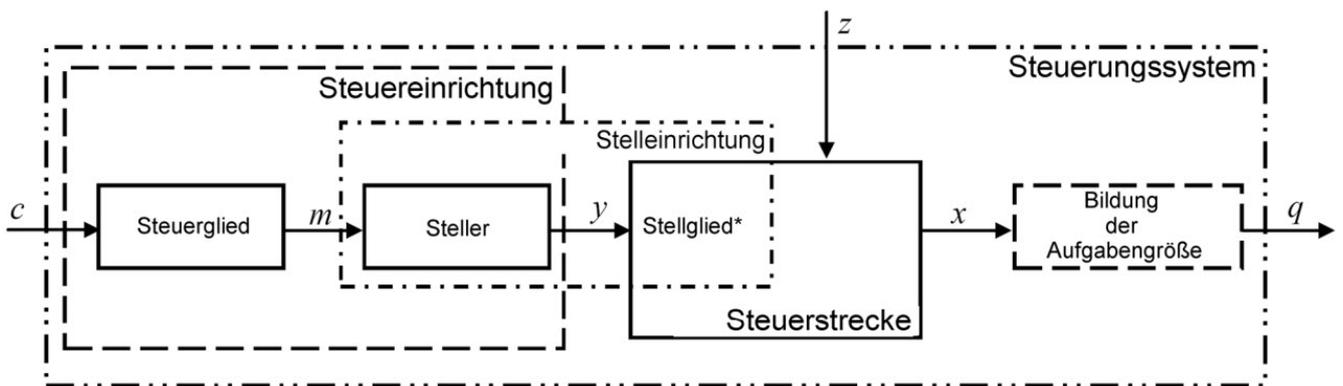


Abbildung 3-2: Wirkungsplan mit typischen Elementen eines elementaren Steuerungssystems¹⁴⁶

Bezogen auf Bauprozesse ist diese Art der Steuerung kein hinreichendes, aber ein wichtiges Instrument zur Lenkung und zur Planung. Es liegt dabei ein offener Wirkungsweg ohne Rückkopplung vor und es erfolgt keine Reaktion des Systems auf Störungen.

Bei einer *Regelung* findet entgegen der *Steuerung* ein geschlossener Wirkungsablauf statt (vgl. hierzu Abbildung 3-3). *Regelung* ist „ein Vorgang, bei dem fortlaufend eine variable Größe, die Regelgröße erfasst (gemessen), mit einer anderen variablen Größe, der Führungsgröße, verglichen und im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird“.¹⁴⁷

Das System erreicht somit die vom „Entscheider“, dem Regelglied vorgegebene Sollgröße durch eine Rückkopplung des Outputs. Die Differenz aus der Sollgröße und der aus dem System, der sog. Regelstrecke, gewonnenen Information über den aktuellen Output bestimmt den Systeminput in der Folgeperiode über Input aus dem Regler als sog. Stellgröße.

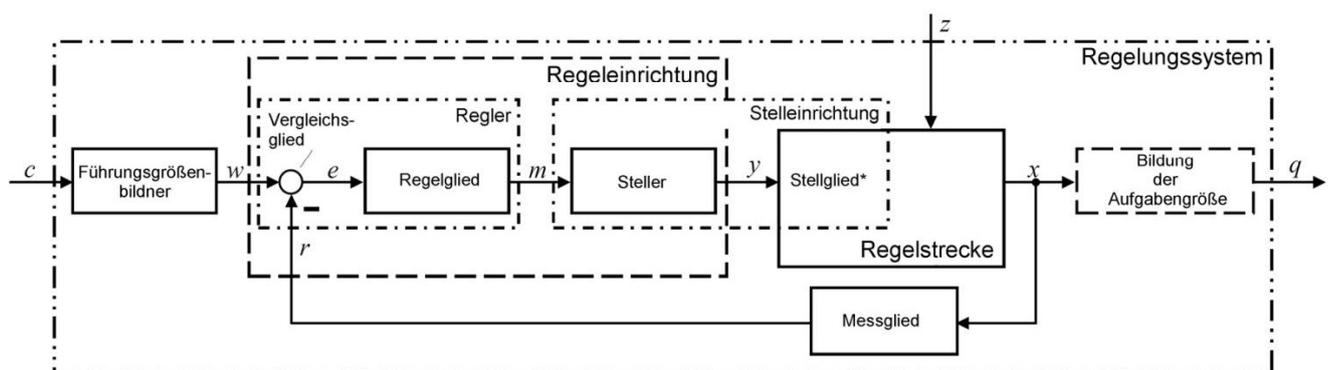


Abbildung 3-3: Wirkungsplan mit typischen Elementen eines elementaren Regelungssystems¹⁴⁸

¹⁴⁶ DIN IEC 60050-351 2014, S. 42.

¹⁴⁷ DIN IEC 60050-351 2014, S. 136.

¹⁴⁸ DIN IEC 60050-351 2014, S. 43.

Die Regelung besitzt entgegen der Steuerung im Wesentlichen eine Rückkopplung. Bezogen auf Prozesse im Bauwesen entspricht dies im Allgemeinen dem operativen Controlling. Jedoch wird dort häufig der Terminus *Steuerung* verwendet. Das liegt daran, dass im deutschen Sprachgebrauch sowie in der deutschen Literatur mit dem Begriff *Steuerung* zwar eine Kreiswirkung einhergeht, diese jedoch mit diskreten Messintervallen und diskreten Stelleingriffen verläuft. Das entspricht nicht der für die Regelung charakteristischen Eigenschaft nach LUNZE, wonach die Anzahl der Messungen sowie die daraus resultierenden Maßnahmen nicht „abzählbar“ sein dürfen und somit kontinuierlich oder quasikontinuierlich sind.¹⁴⁹

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird daher für eine Steuerung in der offenen Wirkungskette der Begriff **Steuerkette**, für eine Steuerung mit diskreten Messintervallen der Begriff **Steuerkreis** und für eine Steuerung mit (quasi-) kontinuierlichen Messintervallen der Begriff **Regelkreis** verwendet.

Regelkreise besitzen den Vorteil, dass sie trotz instabiler Prozesse, nichtmessbarer Störungen oder dynamischen Vorfällen auf der Regelstrecke ihre Funktionstüchtigkeit nicht verlieren.¹⁵⁰ Bezogen auf das Bauwesen gilt dabei, dass die einzelnen Prozesse nicht exakt bekannt sein müssen. Die eben genannte Robustheit ermöglicht dem Regelungssystem eine Anpassung an die einzelnen Prozesse der Ausführung, auch wenn diese sich zu anderen Projekten oder gar innerhalb desselben Projektes unterscheiden. Durch die Rückführung der Information mittels Rückkopplung werden dynamische Auswirkungen in der Regelungseinheit durch die zyklische Betrachtung einbezogen.

¹⁴⁹ Vgl. Lunze 2020, S. 11.

¹⁵⁰ Vgl. Lunze 2020, S. 10.

3.2. Grundlagen des Bauprojekt-Controllings

In der Sphäre der Bauindustrie und somit vor dem Hintergrund von Bauprojekten bildet das Controlling ein System, durch welches das Management eines Unternehmens in der Lage ist, laufende Kern- und Supportprozesse zu überprüfen und zu regeln, sodass die gesetzten Ziele innerhalb der vorgegebenen Rahmenbedingungen erreicht werden können. Dies beinhaltet ebenso die Entwicklung von Handlungsalternativen wie die Unterstützung bei Entscheidungsvorgängen.

Es ist zu differenzieren zwischen dem Unternehmens-Controlling und dem Bauprojekt-Controlling, auch Baustellen-Controlling genannt. Ersteres ist den Supportprozessen gemäß Abbildung 2-1 auf Seite 18 dieser Arbeit zuzuordnen. Das BPC wird hingegen den Kernprozessen zugeordnet. Beide bedingen die Geschäftsprozesse in der Prozesslandkarte einer Bauorganisation. Das Bauprojekt-Controlling stellt das Steuerungssystem dar, durch welches die Projektleitung mit entsprechenden Instrumenten und Informationen versorgt wird, die sie zur Überwachung, Steuerung und Regelung des Bauprojektes benötigt. Auch dies beinhaltet die Entwicklung von Handlungsalternativen sowie die Unterstützung bei Entscheidungsvorgängen innerhalb des Projektes.¹⁵¹ Das BPC bietet einen zentralen Bezugsrahmen, um diverse Arbeitsschritte unterschiedlicher Beteiligter inkl. der komplexen Zusammenhänge der entsprechend zugehörigen Planungs- oder Bauleistungen zu bewerten und abzuwickeln.¹⁵² Die Zielsetzung ist dabei eine frühzeitige, auf das Bauprojektende gerichtete Betrachtung der jeweils aktuellen Lage des Bauprojektes. Diese Informationen werden zum frühestmöglichen Zeitpunkt zur Steuerung der Produktivität sowie des Ergebnisses verwendet. Das BPC wird folglich automatisch bei jedem Projekt als System der Selbststeuerung und nicht der Fremdkontrolle verwendet.¹⁵³

Im deutschen Sprachgebrauch wird der englische Begriff „Controlling“ genutzt, da eine deutsche Übersetzung der weitreichenden Bedeutung des Fachterminus nicht gerecht wird. Neben den klassischen Übersetzungen wie „kontrollieren“ oder „prüfen“ beinhaltet das Controlling ebenfalls gewisse Aufgaben aus dem Spektrum der Planung resp. der Steuerung. Die „Kontrolle“ ist somit ein Teilbereich des Controllings.¹⁵⁴ Darüber hinaus wird der Begriff Bauprojekt-Controlling vor dem Hintergrund der vorliegenden Arbeit als sinnvoller erachtet als der Begriff Baustellen-Controlling, da das zu betrachtende Controlling nicht nur die Phase der Bauausführung betrifft, sondern auch vor- und nachgelagerte Prozesse wie Angebotsphase, Arbeitsvorbereitung, Projektanalyse, etc. beinhaltet.¹⁵⁵

¹⁵¹ Vgl. Motzko 2022.

¹⁵² Vgl. Motzko 2013, S. 3.

¹⁵³ Vgl. Jacob, et al. 2018, S. 523–524.

¹⁵⁴ Vgl. Jacob, et al. 2018, S. 547.

¹⁵⁵ Vgl. Jacob, et al. 2018, S. 451.

3.2.1. Mehrebenensteuerung bei Bauprojekten

Das Bauprojekt-Controlling stellt nach den im vorherigen Abschnitt gegebenen Definitionen ein Steuerungssystem dar, das die Bauleitung bei der Planung und Kontrolle der Baustelle unterstützen soll.¹⁵⁶ Ein solches wird notwendig, da entlang des Veränderungsprozesses des Bauwerks, sprich der Bauausführung, von außen Störgrößen auf das System wirken. Ziel dieser Steuerungsmaßnahmen ist es folglich, den Zustand eines Systems so zu verändern, dass es entweder erneut dem vorab definierten oder dem neu definierten Zustand entspricht.

Bei dieser Art von Betrachtung der Baustellen spielt der zeitliche Faktor eine übergeordnete Rolle. Es ist notwendig zügig auf die den geplanten Bauprozess störenden Faktoren zu reagieren, um deren Auswirkungen möglichst gering zu halten. Dabei ist weder die Häufigkeit noch die Art der im Verlauf eines Projektes auftretenden Störungen eindeutig festgelegt oder vorhersehbar. Zu diversen Zeitpunkten ist der Zustand des Systems resp. der Leistungen zu ermitteln und mit dem Zielzustand abzugleichen. Dies entspricht dem vorab dargestellten zirkulären Prozess der Regelung, bei dem der Zustand des Systems wiederholt überprüft wird, da sich Kenngrößen zeitlich ändern. Hier gilt der vorab eingeführte Regelkreis als ein dynamisches System.¹⁵⁷

Bezogen auf die Betrachtung der Baustelle gilt es nach HEIM als sinnvoll, durch kontinuierliches Monitoring des Projektcontrollings potenzielle Schwachstellen und Fehlentwicklungen im Sinne eines Frühwarn- und Steuerungssystems zu erkennen und somit der Baustellenführungsebene alternative Steuerungsmaßnahmen aufzuzeigen.¹⁵⁸ Darüber hinaus kann eine frühzeitige Bereitstellung von auf den Bau ausgerichteten Informationen zu einer besseren auftragsbezogenen Liquidität und Finanzsituation des Bauprojekts führen. Die Aktualität der zugehörigen Zahlen, bezogen auf Kosten als auch auf Leistungen, ist infolgedessen eines der höchsten Güter innerhalb des jeweiligen Projektes. Das bedeutet, Leistungen sollten zeitnah ermittelt werden und möglichst der tatsächlich erbrachten Bauleistung entsprechen. Die Bauleitung hat dabei die Aufgabe baubetriebliche und kaufmännische Bereiche des Controllings als gesamtheitlich zu betrachten, denn nur so ist eine einheitliche Betrachtung der Leistungen möglich. Die Form der Erfassung und Bewertung der realisierten Leistungen nimmt eine übergeordnete Rolle ein, da ohne eine wirklichkeitstgetreue und sachgerechte Leistungsbewertung das Ist-Ergebnis des Projektes von der Realität abweichend dargestellt wird. Eine qualitative Aussage über den aktuellen Erfolg oder Misserfolg des Projektes kann ansonsten nur bedingt hinreichend getroffen werden, aussagekräftige Prognosen sind ferner nur schwer möglich.¹⁵⁹

Für eine kontinuierliche Betrachtung der Prozesse in der Bauausführung sind die jeweiligen Prozesse automatisiert resp. rechnergestützt zu erfassen, zu identifizieren und zu interpretieren. Voraussetzung dafür ist eine Abbildung der Plan-Größen in einem Bauwerksinformationsmodell, mit dem die Statusänderungen der erbrachten Leistungen dynamisch verglichen werden

¹⁵⁶ Vgl. Jacob, et al. 2018, S. 524.

¹⁵⁷ Vgl. Lunze 2020, S. 2.

¹⁵⁸ Vgl. Heim 2002, S. 1.

¹⁵⁹ Vgl. Jacob, et al. 2018, S. 540.

können. Diesbezüglich muss der jeweils aktuelle Zustand der Plan-Größen sowie der definierte Bauablauf aktualisiert werden.¹⁶⁰

Bei der Prozessidentifikation werden nach MOTZKO 2013 zwei Verfahren unterschieden, die statusbasierte und die ereignisbasierte Prozessidentifikation. Beide Verfahren verfolgen eine unterschiedliche Strategie in der Erfassung und können daher auch in unterschiedlicher Häufigkeit erfolgen. Die statusbasierte Identifizierung kann zu eigens gewählten diskreten Zeitpunkten erfolgen. Die ereignisbasierte Identifizierung muss hingegen, sofern technisch möglich, kontinuierlich erfolgen, da zu jederzeit ein Ergebnis bspw. in Form einer Störung auftreten kann.¹⁶¹ Für weiterführende Informationen zu diesen Arten der Prozessidentifikation ist entsprechende Literatur heranzuziehen.

Ungeachtet der Art der Prozessidentifikation können die entsprechend automatisiert erfassten und interpretierten Prozesse inkl. des jeweiligen Zustands innerhalb des Bauprojekt-Controllings für eine automatisierte Steuerung Verwendung finden. Im idealen Fall sind sie Teil einer automatisierten Mehrebenensteuerung für Prozesse der Planung, der Arbeitsvorbereitung, der Projektleitung sowie der Bauausführung. Solche Wirkungen resp. Wechselwirkungen sind in Abbildung 3-4 dargestellt und werden nachfolgend erläutert.

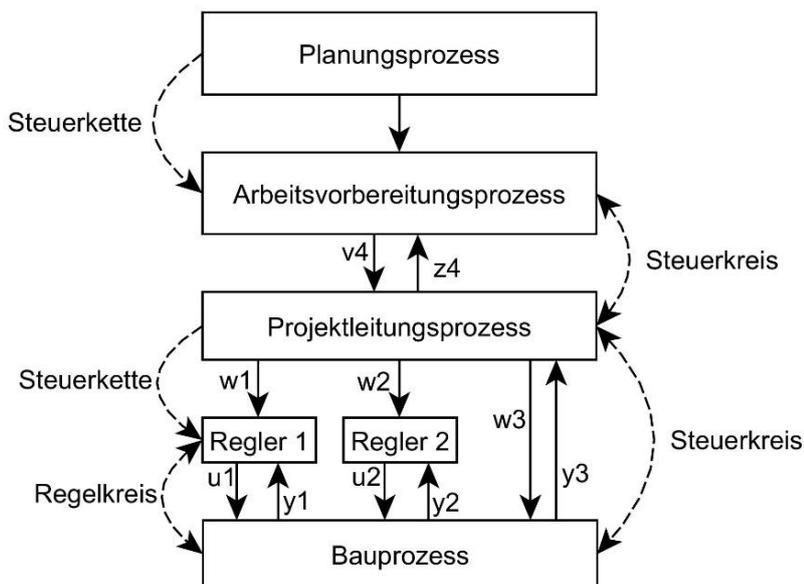


Abbildung 3-4: Struktureller Aufbau einer Mehrebenensteuerung für Bauprojekte¹⁶²

Die Mehrebenensteuerung stellt eine vereinfachte und idealisierte Beziehung zwischen der Planung, der Arbeitsvorbereitung, der Projektleitung und der Bauausführung bezogen auf Steue-

¹⁶⁰ Vgl. Motzko 2013, S. 18.

¹⁶¹ Vgl. Motzko 2013, S. 19.

¹⁶² Eigene Darstellung

rungs- und Regelungsmechanismen innerhalb von Bauprojekten dar. Hierbei wird die im Bauwesen häufig angewendete baubegleitende Planung aus der Betrachtung entfernt, sodass die Arbeitsvorbereitung aus der Planung ohne Rückkopplung resultiert. Es besteht somit eine Steuerkette nach Kapitel 3.1.2.

Die zweite Ebene der Mehrebenensteuerung umfasst den Prozess der Arbeitsvorbereitung. In diesem Prozess werden die Fertigungstechnologie und die notwendigen Ressourcen für den Bauprozess festgelegt, es erfolgt die Terminplanung und die Überführung der Angebots- in die Arbeitskalkulation als Basis für den Projektleitungsprozess und der dort gelagerten Steuerung resp. Regelung. Bei Projekten mit geringerem Umfang ist es teils üblich, dass innerhalb des Arbeitsvorbereitungsprozesses ebenfalls der Bauprozess unterstützt wird. Dieser Aspekt wird in der vorliegenden Betrachtung ausgeschlossen.¹⁶³

Die Prozesse der Arbeitsvorbereitung und der Projektleitung stehen in zeitlich versetzter Wechselwirkung, bestehend aus der Informationslieferung v4 und z4. Aus der Arbeitsvorbereitung werden die oben genannten Informationen an die Projektleitung im Sinne der Bauausführung übertragen und dort umgesetzt. In unterschiedlich großen, jedoch zeitlich versetzten Abständen erfolgt eine Rückmeldung aus der Projektleitung in die Arbeitsvorbereitung. Meist erfolgt dies in kürzeren Zeitabständen, wenn Bedarf einer Überarbeitung besteht. Aus dem Projektleitungsprozess erfolgt eine Informationsübertragung in den Bauprozess, wobei diese beiden wiederum in zeitnaher Wechselwirkung stehen. Ein Steuerkreis wird erreicht, indem der Bauprozess über die Informationslieferung w3 und y3 mit dem Projektleitungsprozess in Verbindung steht. Betroffen ist hierbei vorwiegend die Durchführungssteuerung innerhalb der Projekte. Da bei jeder Informationsübertragung eine gewisse Remanenz zu verzeichnen ist, kann keine kontinuierliche Datenlieferung erfolgen. Als Beispiel können hier gestörte Bauabläufe oder Planungsänderungen genannt werden. Die Meldung der Störung sowie eine mögliche Anweisung zu deren Behebung kann nur mit einer Verzögerung umgesetzt werden. Es entsteht dann ein Regelkreis, wenn das dynamische System - hier der Bauprozess - von den Reglern 1 und 2 in wiederholter Wechselwirkung beeinflusst wird. Der Einfluss erfolgt in sehr kurzen Zeitabschnitten. Das System gilt somit als kontinuierlich resp. quasikontinuierlich und bildet einen Kreis. Aus dieser Steuerung in einem geschlossenen Wirkungskreis mit kontinuierlicher Messung resp. Datenlieferung erfolgt die Bezeichnung *Regelkreis* nach Kapitel 3.1.2. Dieser Fall liegt bei einer vollständig elektronisch abgewickelten Dispositionssteuerung innerhalb des Bauprojekt-Controllings vor. In Kapitel 3.2.3: Durchführungs- und Dispositionssteuerung wird näher darauf eingegangen.

Auch auf der Ebene von Geschäftsprozessen etablieren sich Regelkreise, da viele technische Prozesse bereits auf diese Weise verbessert werden konnten. Dabei spielt die Zahl der zu treffenden Entscheidungen eine wichtige Rolle. Dezentrale Aufenthaltsorte und somit ein verlängerter Kommunikationsweg werden immer mehr in Frage gestellt. Die zunehmende Komplexität von Bauwerken erschwert die Beherrschbarkeit zentralistischer Systeme, die Entscheidungsfindung muss daher auf der Ebene des Projektmanagements neu gedacht werden. Mehrwert brin-

¹⁶³ Vgl. Motzko 2013, S. 10.

gen hierbei temporäre Netzwerke, die die Interaktion zwischen einzelnen Ressourcen fördern.¹⁶⁴ Als Ressourcen gelten in diesem Fall neben der Projektleitung unter anderem auch Instanzen wie Behörden, Zulieferer oder der Auftraggeber (AG).

3.2.2. Kernaufgaben des Bauprojekt-Controllings

Nach der Erläuterung wie Steuerungen und Regelungen innerhalb des Bauprojekt-Controllings ablaufen, werden nachfolgend die Kernaufgaben des Bauprojekt-Controllings als Steuerungsmechanismus dargestellt. Kernaufgaben sind dabei die in Abbildung 3-5 dargestellten Planung, Kontrolle, Steuerung und Informationsversorgung. Sie alle werden während der gesamten Bauprojektrealisierung aufrechterhalten und umfassen den Bereich der gesamten Organisation in Form des Unternehmens.

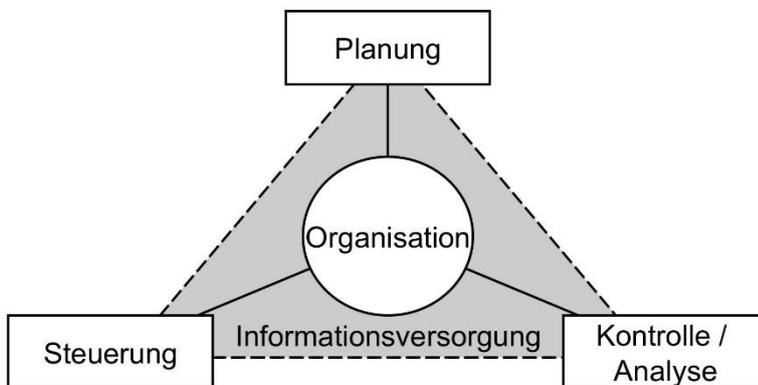


Abbildung 3-5: Kernaufgaben des Bauprojekt-Controllings¹⁶⁵

Die organisatorischen Aufgaben beziehen sich auf die Etablierung, die kontinuierliche Ausführung sowie die Koordinierung des einzelnen oder der zusammenhängenden umgebenden Systeme in Form eines sog. Informationssystems. Dieses stellt ein soziotechnisches System dar, in dem die projektdienstlichen Personen, jedoch auch Informations- und Kommunikationstechnologien die für das Projekt notwendigen Informationen bereitstellen respektive eingeben, verarbeiten, speichern oder abrufen. Die zugrunde liegende Informationsversorgung sollte möglichst automatisiert erfolgen und allen Kernaufgaben als Grundlage dienen. Diesbezüglich spielen Aktualität sowie Zugriffsgeschwindigkeit eine ausschlaggebende Rolle in der Informationsversorgung. Die Aktualität der Informationen ist jeweils zu gewährleisten. Ohne Zugriff auf aktuelle Informationen könnte es unter anderem geschehen, dass Probleme bearbeitet werden, die bereits gelöst werden konnten oder es werden Annahmen getroffen, die durch neue Informationen bereits widerlegt werden konnten.¹⁶⁶

¹⁶⁴ Vgl. Schuh, et al. 2020, S. 25.

¹⁶⁵ Eigene Darstellung in Anlehnung an Jacob, et al. 2018, S. 525.

¹⁶⁶ Vgl. Jacob, et al. 2018, S. 527.

Für eine solche Aktualität ist ein Informationssystem aus *Informations- und Kommunikationstechnik* (IKT) zu etablieren. Als Basis muss diesem eine gemeinsam genutzte Datenbank gelten, die folglich als *Single Source of Information* dient. Jegliche im Prozess des Controllings verwendete Information ist dort zur Verfügung zu stellen. Nur so kann eine ausreichende Informationsversorgung gewährleistet werden. Einzubeziehen ist dort ebenfalls das jeweilige projektspezifische Bauwerksinformationsmodell als zentrale Informationsdatenbank der einzelnen Projekte.

Aufgaben der Planung sind unter anderem das Generieren von Plan- und Soll-Daten als Steuerungsgrößen für das Projekt-Controlling. Darüber hinaus werden Prognosedaten gebildet, die als Abgleich für den zukünftigen Verlauf des Projektes herangezogen werden können.¹⁶⁷ Im Zuge der Kontrolle werden im Projektgeschehen in die Vergangenheit gerichtete Informationen periodisch wiederholt bearbeitet. Dabei wird der Ist-Zustand der Baustelle erfasst und mit den Plan- bzw. Soll-Daten der Arbeits- resp. Prognosekalkulation abgeglichen.¹⁶⁸

Die Steuerung ist zukunftsorientiert, auf das Ende des Projektes gerichtet und hat das Ziel die Effizienz der Produktion sicherzustellen resp. die verwendeten Ressourcen möglichst gering zu halten. Je nach Erkenntnis aus eingetretenen Störungen werden Maßnahmen eingeleitet, die darauf ausgerichtet sind, das in der Planung erarbeitete Ziel möglichst zu erreichen. Wenn das geplante Ziel durch Abweichungen nicht erreicht werden kann, ist der Vorgabewert zu aktualisieren und es sind Prognosen für die Baustellenergebnisse zu berechnen.¹⁶⁹

Die Kernaufgaben des Bauprojekt-Controllings dienen grundlegend dazu, den gesamten Bau auf Basis eines ganzheitlichen Systems zu beschreiben und durchgehend zu unterstützen. Dabei werden drei Bereiche des Bauprojekt-Controllings unterschieden, die zeitlich und prozessual unterschiedlich betrachtet werden müssen. Man spricht von den Phasen vor, während und nach der Bauausführung wie in Abbildung 3-6 dargestellt. Die Prozesse aller drei Bereiche sind jedoch so zu verknüpfen, dass eine durchgängige Datenhaltung möglich ist. So sind bspw. die Daten der Arbeitskalkulation aus Vertragssicht so zu fortzuschreiben, sodass im Anschluss an das Projekt die gesamten Herstellkosten daraus abgeleitet werden können. Dabei müssen unter anderem zwingend alle genehmigten Nachträge enthalten sein, sodass daraus stets eine Einsicht in die veränderte Auftrags- resp. Abrechnungssumme gewährleistet werden kann.

Grundlegend werden im Bauprojekt-Controlling vor der Bauausführung Daten für die Angebotskalkulation aufbereitet und nach Auftragseingang in Informationen der Auftragskalkulation überführt. Dort erfolgen zwei unterschiedliche Betrachtungen der Arbeitskalkulation. Die Arbeitskalkulation aus Vertragssicht sowie die Arbeitskalkulation aus Prognosesicht. Diese werden zu unterschiedlichen Zwecken geführt. Um nur wenige Beispiele zu nennen, werden in die Arbeitskalkulation aus Vertragssicht vor der Bauausführung unter anderem fixierte Kosten, qualitätsbezogene Informationen sowie Informationen zur Bauzeit eingebracht. Während der Bauausführung werden alle genehmigten Nachträge eingetragen. All dies führt zu den bereits vorab

¹⁶⁷ Vgl. Jacob, et al. 2018, S. 525.

¹⁶⁸ ebenda

¹⁶⁹ ebenda

angesprochenen Herstellkosten des Projektes am Ende des Bauprojekt-Controllings und somit nach der Bauausführung.

Die Arbeitskalkulation aus Prognosesicht umfasst im Bauprojekt-Controlling vor der Bauausführung Informationen über Veränderungspotenzial der Herstellkosten aus der Arbeitsvorbereitung und richtet den Blick auf Chancen und Risiken im Projektverlauf. In diese Art der Arbeitskalkulation fließen während der Bauausführung periodisch die Ist-Kosten aus dem Rechnungswesen ein. Es entsteht ein periodischer Controlling-Mechanismus, der so lange fortzuführen ist, bis die Baumaßnahme abgeschlossen wurde. Der Vergleich der Soll-Kosten aus der Soll-Auftrags-Arbeitskalkulation mit den Ist-Kosten aus der Ist-Prognose-Arbeitskalkulation ermöglicht ebenfalls periodisch den Soll-Ist-Vergleich der Arbeitskalkulation sowie eine Prognostizierung des Kostenverlaufs des Projektes. Weiterführende Informationen zum Soll-Ist-Vergleich sind entsprechender Fachliteratur zu entnehmen.

Für die Erfassung von unter anderem Kosten und Leistungen während der Bauausführung sind entsprechende Perioden zu bestimmen. Wie bereits vorab angesprochen, ist die Zeitspanne der Erfassung dabei so zu wählen, dass eine Abbildung der Kosten der Bauausführung in demjenigen Zeitraum erfolgen kann, in dem die jeweiligen Kosten der Ausführung abgerechnet werden. Sofern Leistungen ausgeführt werden, die eine hohe Komplexität darstellen und eine detailliert gegliederte Leistungserfassung benötigen, ist es zielführend, die Perioden der automatisierten Aufnahmen anzupassen und die Dauer zu verringern. Beispiele für die automatisierte Erfassung von Leistungen werden in Kapitel 6.5.3 gegeben.

Der Begriff *zeitnah* spielt in der Erfassung der Leistung eine besondere Rolle. Eine zeitnahe Leistungsfeststellung soll es den Baustellenführungskräften ermöglichen, eine effektive Projektfortschrittskontrolle permanent und nicht nur punktuell aufrecht zu erhalten.¹⁷⁰ Zeitnah bedeutet in diesem Fall kontinuierlich resp. quasikontinuierlich. Letzteres bedeutet wiederum, dass eine Abtastung und Regelung zeitdiskret, sprich nicht direkt kontinuierlich, sondern zu entsprechenden Zeitabständen erfolgt. Wird dabei der Abstand der Erfassung möglichst klein gehalten, so stellt der Regler im Sinne von Abbildung 3-3: Wirkungsplan mit typischen Elementen eines elementaren Regelungssystems in Kapitel 3.1.2 eine hinreichende Approximation des abzubildenden kontinuierlichen Reglers dar. Der Zeitabstand bei der Aufnahme muss so klein gehalten werden, dass der Einfluss der Zeitdiskretisierung vernachlässigbar ist.¹⁷¹ Je nach Geschwindigkeit der Übertragung, Interpretation und Rückmeldung der Daten aus dem Erfassungsprozess können die Maßnahmen der Baustellenführungskräften zügiger oder weniger zügig umgesetzt werden.

¹⁷⁰ Vgl. Heim 2002, S. 2.

¹⁷¹ Vgl. Svaricek 2012, S. 68.

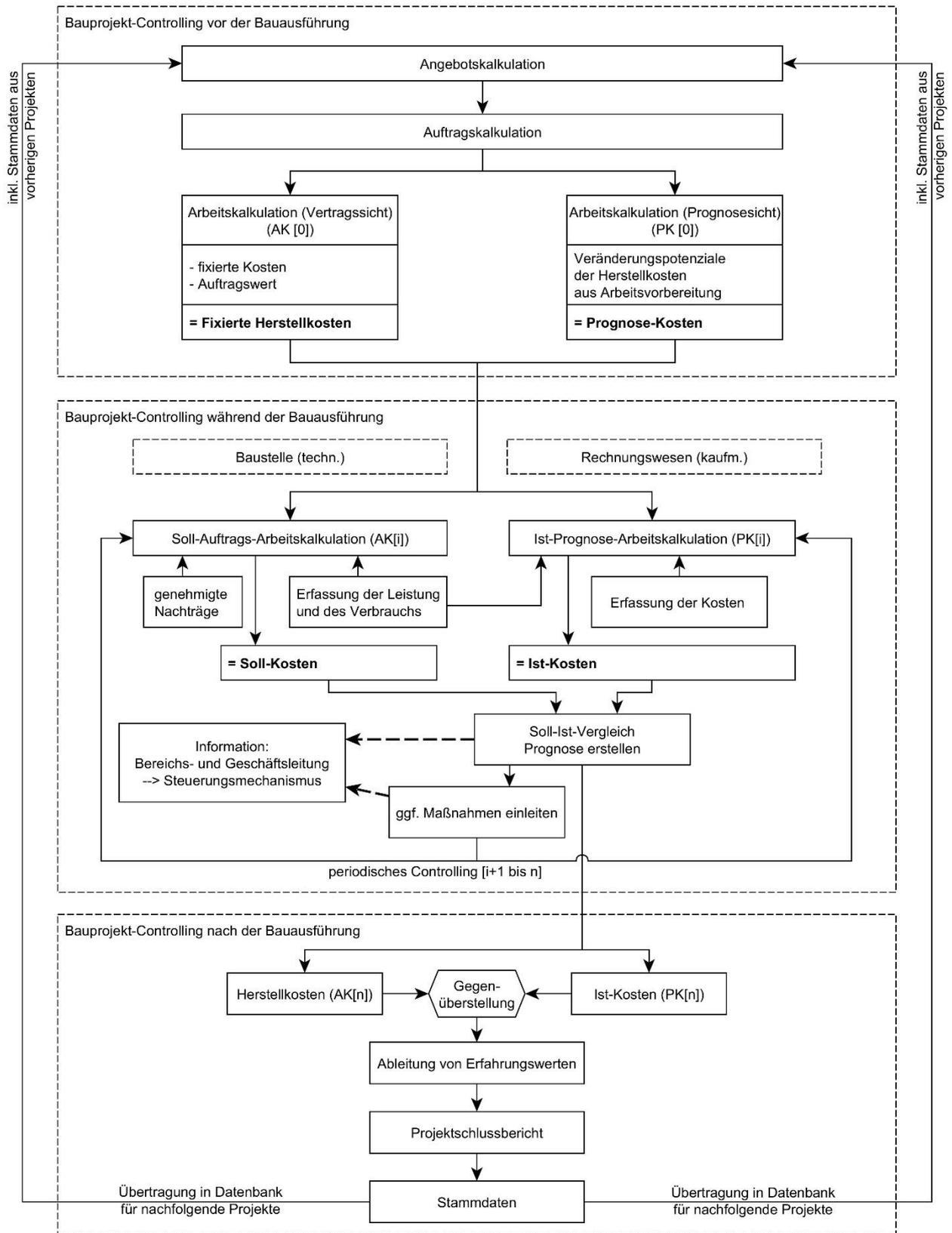


Abbildung 3-6: Phasen des Bauprojekt-Controllings¹⁷²

¹⁷² Eigene Darstellung in Anlehnung an Jacob, et al. 2018, S. 527 sowie Girmscheid & Motzko 2013, S. 130.

Kosten für eine Prognoserechnung werden im Bauprojekt-Controlling während der Bauausführung entsprechend der erhaltenen Rechnungen eingetragen. Die jeweiligen Kosten treten meist periodisch auf, jedoch richtet sich die Spanne an dem entsprechendem Abschlagszeitraum aus. Alle während der Bauausführung erfassten Kosten fließen kumuliert in die Ist-Kostenübersicht im Bauprojekt-Controlling nach der Bauausführung ein. Dort werden sie den gesamten Herstellkosten des Projektes gegenübergestellt, analysiert und es können Erfahrungswerte davon abgeleitet werden. Die Resultate werden wiederum im Projektschlussbericht festgehalten. Darüber hinaus werden die Erfahrungswerte in die bereits angesprochene Datenbank übertragen, wo sie in die Stammdaten für die Verwendung in zukünftigen Projekten übergehen.

3.2.3. Durchführungs- und Dispositionssteuerung

Für die Steuerung des Bauprojektes während der Bauausführung können die Steuerungseinrichtungen der Durchführungs- und Dispositionsteuerung verwendet werden (vgl. Abbildung 3-7). Diese bauen auf Kontrollrechnungen und Abweichungsanalysen auf und stellen infolgedessen die Analyse auf eine fundierte und realistische Übersicht der Situation des Projektes zum jeweiligen Stichtag.¹⁷³

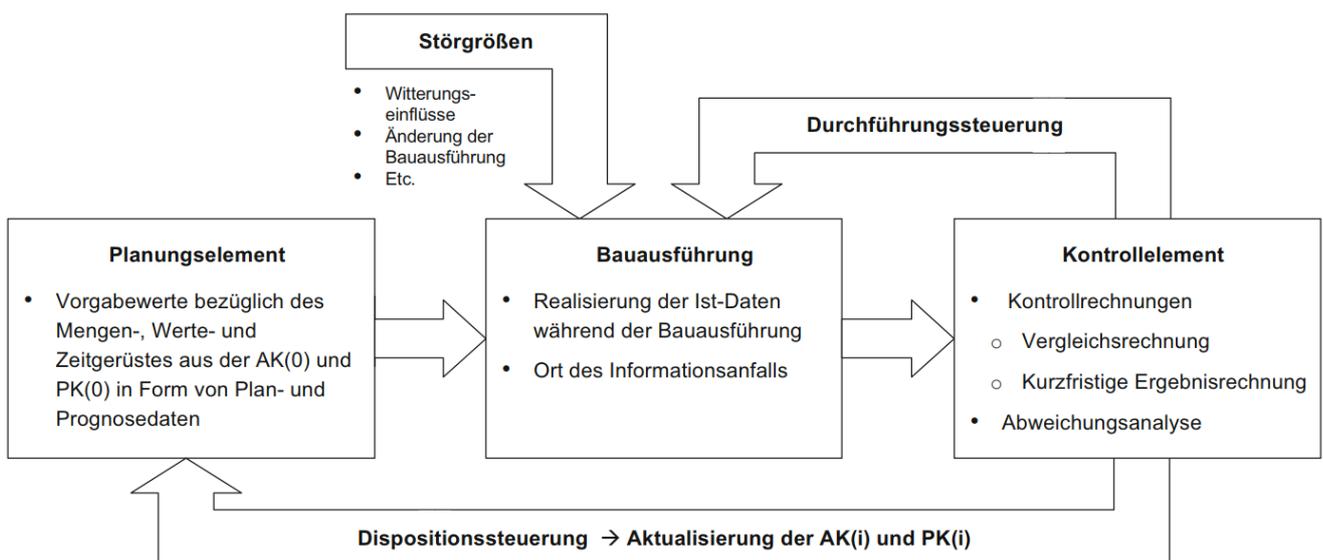


Abbildung 3-7: Steuerungsrichtungen des Bauprojekt-Controllings¹⁷⁴

In der Durchführungssteuerung werden Korrekturen in laufenden Aktivitäten der Bauausführung durch bspw. die Anpassung der Personenanzahl, Änderungen des Bauverfahrens oder Än-

¹⁷³ Vgl. Jacob, et al. 2018, S. 531.

¹⁷⁴ Jacob, et al. 2018, S. 531.

derungen der Gerätekapazität vorgenommen. In der Dispositionssteuerung handelt es sich vornehmlich um Eingriffe in das Planungselement vor dem Hintergrund einer Betrachtung der Auswirkungen auf das Projektende. Dabei werden auftraggeberseitig zu vertretenden Kostenänderungen in die Arbeitskalkulation aus Vertragssicht eingearbeitet, auftragnehmerseitig zu vertretenden Kostenänderungen werden in Arbeitskalkulation aus Prognosesicht überführt.¹⁷⁵

Durch beide Steuerungseinrichtungen werden auftretende Störgrößen wie Witterungseinflüsse oder Änderungen der Bauausführung erfasst und zeitnah verarbeitet. Somit werden wiederum zeitnahe Prognostizierung mit Entscheidungsvorlagen ermöglicht, welche dem Bauprojektmanagement in der Durchführungssteuerung helfen, zeitnah einzugreifen und frühestmöglich Gegenmaßnahmen einzuleiten. Die Zeitnähe ist in diesem Fall abhängig der Messgröße, die zum Vergleich herangezogen wird. Das entspricht der Messgröße innerhalb eines Abschlagszeitraums.

Im Grund erfolgt eine Steuerung zum Ende jedes Abschlagszeitraums resp. jeder Berichtsperiode. Sofern die Erfassung der Informationen für die Arbeits- sowie Prognosekalkulation elektronisch erfolgt, können die Daten quasikontinuierlich aufgenommen und verarbeitet werden. Der Berichtszeitraum kann zwar als solcher erhalten bleiben, eine Übersicht sollte allerdings stets aktuell gehalten werden. Je nach Projektgröße und Entscheidungsrelevanz kann der Berichtszeitraum angepasst werden. Aufgrund der möglichen Automatisierung im Eintragen der Daten in der Arbeitskalkulation aus Vertrags- und Prognosesicht kann hier ein zeitnaher Regelungsmechanismus eingesetzt werden.

¹⁷⁵ ebenda

4. Technischer und sozio-technischer Bezugsrahmen

Das übergeordnete Ziel der vorliegenden Arbeit besteht in der Schaffung von Möglichkeiten zur Beschleunigung der durch Menschen vorgegeben Prozessgeschwindigkeit und der daraus resultierenden Minimierung der den Menschen betreffenden Problemstellungen. Unter Beachtung der Erkenntnisse aus den empirischen Untersuchungen wie bspw. der Notwendigkeit der allgemeinen Erhöhung des Automatisierungsgrades der Prozesse im Projektgeschäft unter anderem in der notwendigen Automatisierung der Eingabe, Pflege und Verarbeitung von Daten für Entscheidungsprozesse sowie einer Etablierung einer zentralen Datenhaltung, wird der technische und sozio-technische Bezugsrahmen dieser Arbeit unter Zuhilfenahme der in Kapitel 3.1 dargestellten Thematik des systemischen und kybernetischen Denkens in zirkulärer Darstellung vor dem Hintergrund der Industrie 4.0 erläutert.

Kapitel 4.1 beginnt infolgedessen mit einem allgemeinen Einblick in die Bereiche der Industrie 4.0 und in deren historischen Verläufe. Zugehörige Technologien als Kern resp. als Bausteine der Industrie 4.0 werden in Kapitel 4.2 dargestellt. Die Kommunikation spielt diesbezüglich eine wesentliche Rolle in der Vernetzung der einzelnen Bausteine sowie in der Anknüpfung der sozio-technischen Ebene als Bindeglied zum Menschen. Aus diesem Grund werden die Bereiche der Interaktion, spezieller die Erfassung, Verarbeitung und Verwendung sowie die Bereiche der Interpretation von Daten als Interaktionsthematik resp. Schnittstelle für den Menschen näher erläutert.

Eine Steigerung der Verfügbarkeit von Informationen resultiert in deren ebenso hohen Steigerung in der Verwendbarkeit für Menschen. Diesbezüglich wird in Kapitel 4.3 die Thematik Digitale Abbilder als Grundlage möglicher Anwendungsfälle vor dem Hintergrund von Projekten im Bauwesen beschrieben. Darüber hinaus wird auf unterschiedliche Definitionen eingegangen, die zu diesen Aspekten im Bereich der Forschung diskutiert werden. Neben der bereits bekannten Methode BIM umfasst dies ferner Digitale Modelle, Digitale Schatten und Digitale Zwillinge sowie deren jeweilige Verwendung. Die in der Forschung beschriebene, den in der vorliegenden Arbeit verwendeten Modellkategorien zugehörige Methode *Digital Twin Construction* wird im Anschluss in Kapitel 4.4 erläutert.

Den Abschluss des Kapitel 4. bildet die Spezifizierung der aus der empirischen Forschung sowie dem technischen und sozio-technischen Bezugsrahmen abgeleitete Forschungslücke in Kapitel 4.5

4.1. Industrie 4.0

Im Allgemeinen gelten drei Stufen der sog. industriellen Revolution als abgeschlossen. Die erste industrielle Revolution verlief gemäß Abbildung 4-1 von Mitte bis Ende des 18. Jahrhunderts und umfasste die Mechanisierung zur Produktionssteigerung innerhalb der Landwirtschaft und Rohstoffgewinnung. Eine der größten Erfindungen war die Dampfmaschine des Schottens James Watt (1736-1819). Zu Beginn des 20. Jahrhunderts begann die zweite industrielle Revolution durch die Einführung von flächendeckender Massenproduktion mittels Fließbandarbeit auf Basis der eingeführten Elektrifizierung von Städten, Eisenbahnen und Produktionsstätten. Mitte des 20. Jahrhunderts führte die Erfindung des Computers und die Weiterentwicklung hin zur Steuerung von Maschinen mittels dieser Computersysteme und automatisierten Prozessen zur dritten industriellen Revolution.¹⁷⁶

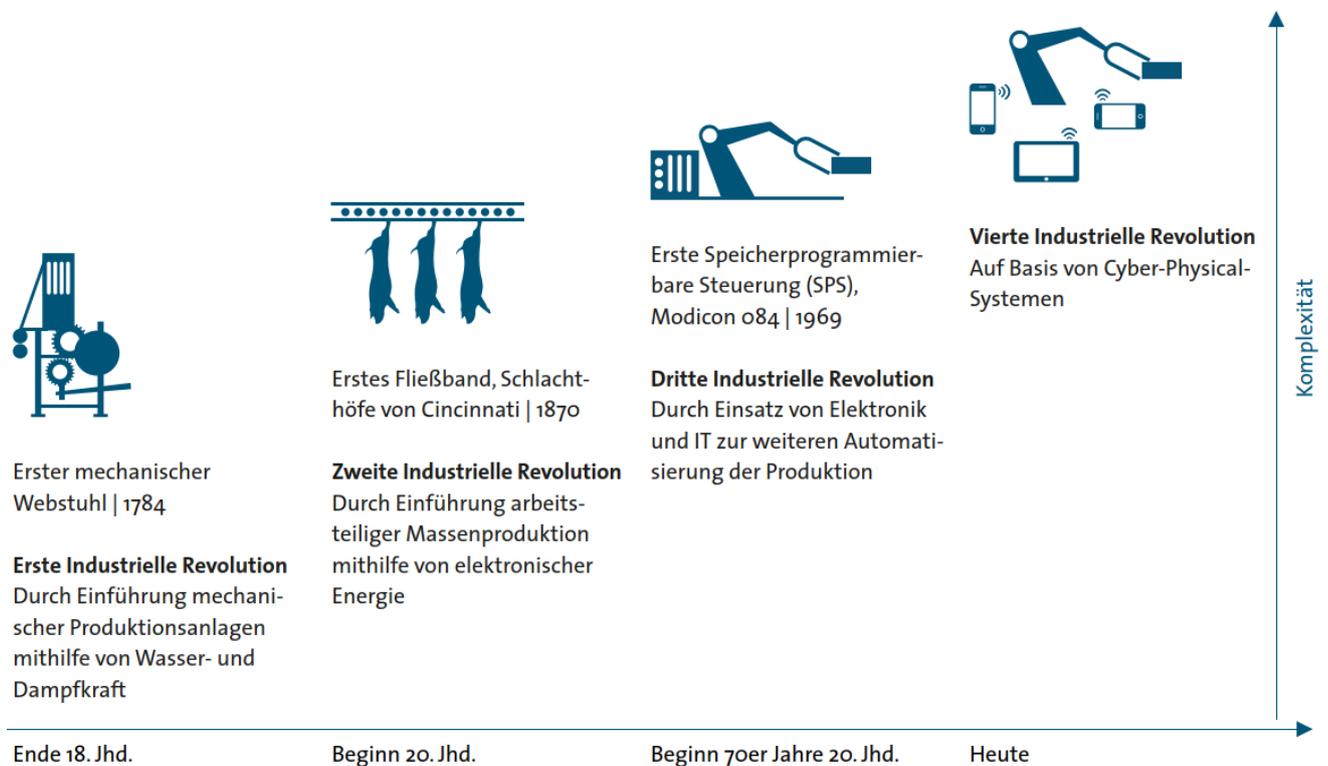


Abbildung 4-1: Die vier Stufen der industriellen Revolution¹⁷⁷

Aktuell befinden wir uns auf der Schwelle zur vierten Stufe der industriellen Revolution. Sie wird durch den Begriff Industrie 4.0 dargestellt. Diese wird nach BITKOM (2014) als die intelligente Vernetzung von Produkten und Prozessen in der industriellen Wertschöpfung bezeichnet. Dabei soll die Generierung von Mehrwerten durch effizientere oder neue Prozesse und die Erzielung besserer Absatzchancen für höherwertige Produkte, Dienstleistungen bzw. deren

¹⁷⁶ Vgl. Bitkom 2014, S. 9.

¹⁷⁷ Bitkom 2014, S. 10.

Kombinationen erreicht werden.¹⁷⁸ Im Mittelpunkt steht die echtzeitfähige, intelligente, horizontale und vertikale Vernetzung von Menschen, Maschinen, Objekten in IKT-Systemen.¹⁷⁹ Erzielt werden soll diesbezüglich eine Unterstützung von Entscheidungsprozessen resp. eine autonome Entscheidung der Systeme auf Basis von Echtzeitdaten.¹⁸⁰ Als Kerntechnologien der dynamischen Vernetzung gelten unter anderem das Internet der Dinge, Cloud Computing, Big Data und Digitale Zwillinge (Digital Twin, DT).¹⁸¹ Diese und weitere Kerntechnologien werden in Kapitel 4.2 beschrieben.

Um die genannte Unterstützung von Entscheidungsprozessen näher zu verstehen, muss auf Teilbereiche der zweiten industriellen Revolution zurückgeblickt werden. Diesbezüglich kann in Abbildung 4-2 der Verlauf der Komplexität resp. der Dynamik innerhalb des jeweils vorherrschenden Marktes resp. der jeweiligen Marktsituation im Laufe der letzten zwei Jahrhunderte nachvollzogen werden.

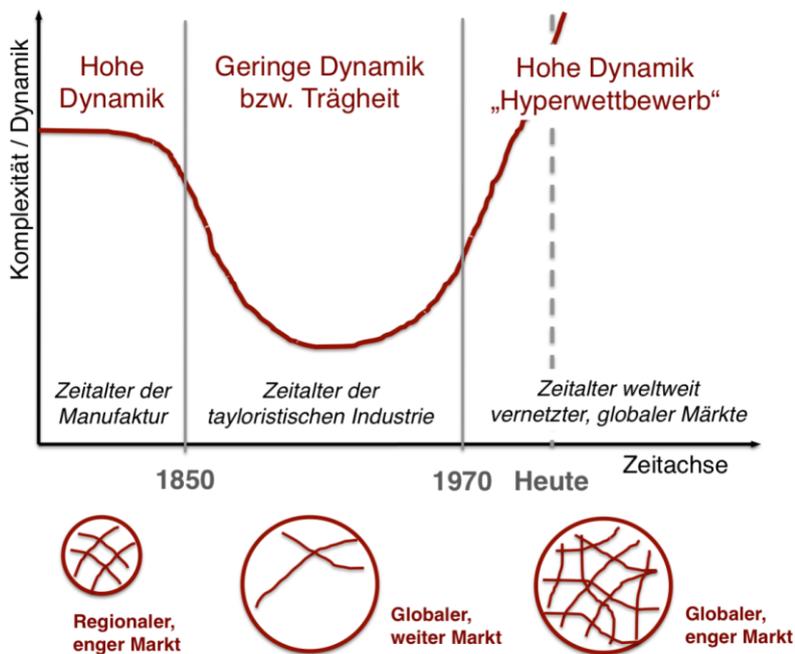


Abbildung 4-2: Die Taylor-Wanne¹⁸²

Vor der ersten industriellen Revolution bestand eine hohe Dynamik innerhalb der Märkte. Diese waren regional angesiedelt und die Anbietenden konnten auf die individuellen Wünsche der Kundinnen und Kunden reagieren. Nach der ersten industriellen Revolution, somit bei der Industrie 1.0 und später auch bei Industrie 2.0, welche in der zweiten Spalte repräsentiert werden,

¹⁷⁸ Vgl. Bitkom 2014, S. 6.

¹⁷⁹ Bitkom 2014, S. 18.

¹⁸⁰ Vgl. Włodarczyk 2022, S. 3.

¹⁸¹ Vgl. Kritzinger, et al. 2018, S. 1018.

¹⁸² Frank 2016, S. 2.

wurde das System der Massenproduktion eingeführt. Es wurde am Fließband stets das gleiche Produkt hergestellt, die Komplexität ging zurück. Darüber hinaus wurde der globale Markt erschlossen und bis dieser weitmaschige globale Markt gesättigt war, ging auch die Dynamik zurück.¹⁸³

Es wurde mit hierarchischen Strukturen und explizit festgelegten Prozessen eine hohe Qualität der Produkte erreicht. Hierbei wurde jedoch das Treffen von Entscheidungen auf eine geringe Anzahl an Expertinnen und Experten reduziert. Auch heute ist diese Art von Struktur in vielen Unternehmen zu finden.

In der Industrie 3.0 stieg gemäß Abbildung 4-2 die Dynamik erneut. Der globale weitmaschige Markt war gedeckt, er wurde weitgehend engmaschig. Durch eine Zunahme des internationalen Wettbewerbs sowie der Modernisierung durch Technologie und damit wiederum durch die Möglichkeit einer hohen Individualisierung bei der Produktion, stieg die Komplexität erneut an. Dieser Prozesse ist noch nicht abgeschlossen und führt in die Industrie 4.0 hinein. Das Entscheidungsverhalten, das teils noch äquivalent zur genannten Industrie 2.0 besteht, kann an einigen Stellen nicht weiter bestehen. Auf diese Thematik wird in Kapitel 5.4.4 eingegangen.

Betrachtet man den Begriff Industrie 4.0 und Teile seiner entsprechenden Kerntechnologien, so wird deutlich, dass diese in verschiedenen Branchen des Industriestandorts Deutschland zu unterschiedlichen Teilen eingesetzt werden. So werden im Automobilbau Mehrwerte vor allem in der Integration von Echtzeitinformationen bei der Produktion durch anpassungsfähige Produktionssysteme, intuitive Mensch-Maschine-Schnittstellen und agile Automatisierung gesehen und eingesetzt.¹⁸⁴ In der Elektro-Branche, speziell bei den elektrischen Ausrüstern sowie der chemischen Industrie entstehen Mehrwerte vor allem in der echtzeitnahen Prozessüberwachung.¹⁸⁵ Überall jedoch besteht eine Verbindung der virtuellen mit der physischen Welt durch die Vernetzung der Systeme und damit die Verwendung von Echtzeitdaten durch Cyber-Physische Systeme.¹⁸⁶

Im Bauwesen werden die Definitionsmerkmale von Industrie 4.0 herangezogen und in den die spezifischere jedoch äquivalent geltende Bezeichnung *Bauen 4.0* überführt. Ausschlaggebend dafür ist die Verwendung der Methode BIM, mit deren Hilfe eine Steigerung der Individualität in Richtung der Wünsche der Kundschaft, die Erreichung einer neuen Stufe von Organisation und Steuerung innerhalb der Bauprozesse sowie die Betrachtung des gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks erreicht wird.¹⁸⁷

Es lassen sich somit ein neues Wertschöpfungspotenzial durch innovative Produkte, neue Dienstleistungen und Geschäftsmodelle sowie effizientere betriebliche Prozesse erkennen.¹⁸⁸

¹⁸³ Vgl. Frank 2016, S. 2.

¹⁸⁴ Vgl. Bitkom 2014, S. 7.

¹⁸⁵ Vgl. Bitkom 2014, S. 7.

¹⁸⁶ Vgl. Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik WGP e. V. 2016, S. 3.

¹⁸⁷ Vgl. Syben 2018, S. 198.

¹⁸⁸ Vgl. Bitkom 2014, S. 7.

Dabei wird die Arbeitsweise der vergangenen Jahrzehnte auf diese Weise hinterfragt und dementsprechend neue Prozesse gebildet, die eine vollständige Ausschöpfung dieses Wertschöpfungspotenzials versprechen. Diesbezüglich spielen Maschinen und Geräte mit eingebetteter Software eine übergeordnete Rolle. Sie wachsen zu verteilten, funktionsintegrierten und rückgekoppelten Systemen zusammen.¹⁸⁹ Für eine ganzheitliche Umsetzung dieser Anforderungen ist eine hohe Konsistenz der verwendeten Daten notwendig. Nach SACKS, et al. besteht jedoch grundlegend ein Mangel an integrierten und zuverlässigen Daten. Eine umfangreiche Verwendung der resultierenden Informationen bspw. aus einer automatisierten Überwachung von Ausführungsleistungen kann aus diesem Grund nur eingeschränkt umgesetzt werden. Informationen über den Ist-Zustand an Baustellen sollten daher in Verbindung mit überwachten Datenquellen und Produktionsplänen gebracht und analysiert werden. Aus den Ergebnissen könnten Aussagen über den aktuellen Stand einzelner Gewerke, die eingesetzten Ressourcen und somit letztendlich über den Projektstatus im Allgemeinen abgeleitet werden.¹⁹⁰

Eine ganzheitliche Ausschöpfung des genannten Potenzials ist lediglich in Kombination mit einer rapiden und schnittstellenfreien Kommunikation möglich, die das gesamte Ökosystem des jeweiligen Projektes umfasst. Dies beinhaltet die Technik, die Organisation, jedoch auch den Menschen als ganz besonderen Aspekt.¹⁹¹ Viel mehr stellt die menschliche Intelligenz eine entscheidende Grundlage für den Erfolg von Industrie 4.0 dar.¹⁹² Eine steigende Automatisierung bedarf einer größeren Verantwortung für Menschen. Digitale Fähigkeiten treten bei Personal in den Vordergrund, kognitive und soziale Fähigkeiten sind jedoch gleichermaßen wichtig. Es bedarf eines Umdenkens in der zukünftigen Arbeitsweise.¹⁹³ Es werden neue Arbeitsrollen entstehen, die Koordination von Projektteilen wird sich ändern und eine Intensivierung der Kommunikation und Kooperation erfordern. All dies führt zu einem erhöhten Weiterbildungsbedarf.¹⁹⁴ Ferner wird gar eine gründlichere bauspezifische Fachkompetenz benötigt, um Projektarbeit auf Basis der Methode BIM umzusetzen.¹⁹⁵

¹⁸⁹ Bitkom 2014, S. 9.

¹⁹⁰ Vgl. Sacks, et al. 2020b, S. 4.

¹⁹¹ Vgl. Bitkom 2014, S. 7.

¹⁹² Vgl. Włodarczyk 2022, S. 5.

¹⁹³ Vgl. Włodarczyk 2022, S. 6.

¹⁹⁴ Vgl. Syben 2018, S. 196.

¹⁹⁵ Ebenda S. 200

4.2. Technologien

Technologische Aspekte bilden das Kernelement der Industrie 4.0. Aus diesem Grund wird nachfolgend auf ausgewählte Technologien zur polysensoralen Erfassung und Verarbeitung von Daten sowie auf deren technologische Voraussetzungen eingegangen. Darüber hinaus werden sowohl die Vernetzung als auch die Interpretation resp. Analyse der Daten hin zu Informationen zusammenfassend beschrieben.

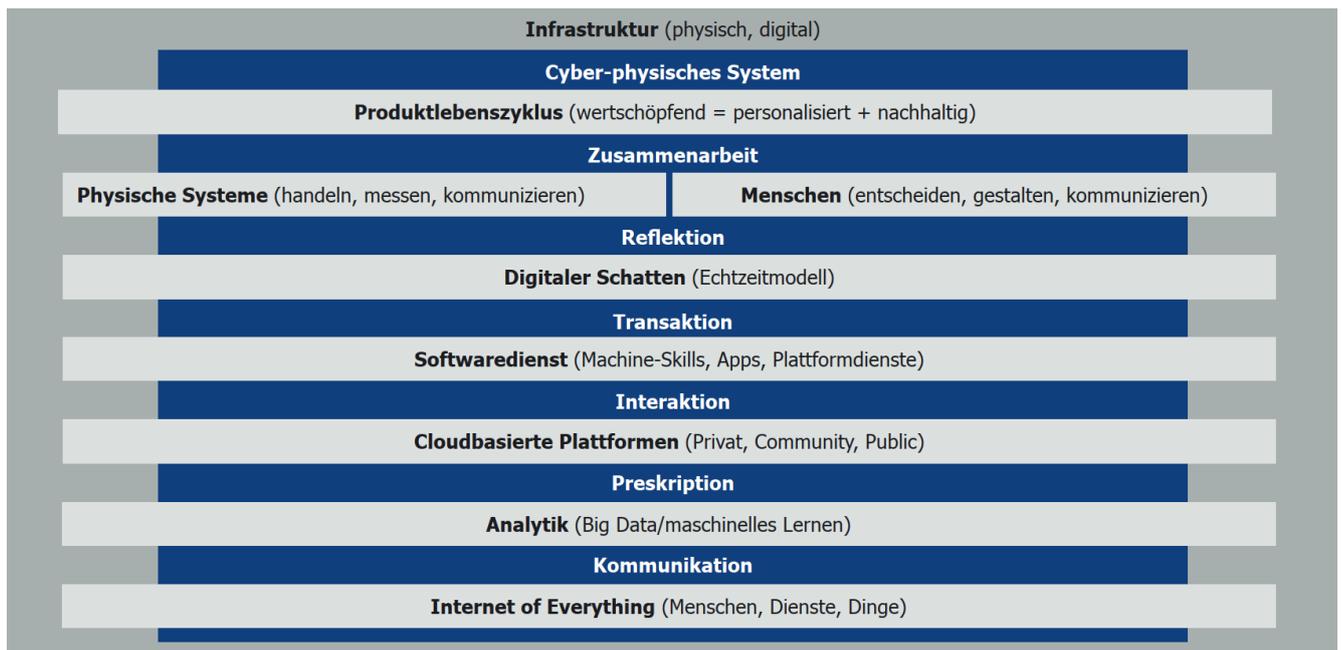


Abbildung 4-3: Bausteine der Industrie 4.0¹⁹⁶

Die WISSENSCHAFTLICHE GESELLSCHAFT FÜR PRODUKTIONSTECHNIK WGP E. V. beschreibt die Bausteine der Industrie 4.0 gemäß Abbildung 4-3. Basis bildet unterdies die Kombination aus physischer mit digitaler Infrastruktur, sodass zwingend eine kontinuierliche Verbindung aller Bausteine untereinander besteht. Als Folge dessen ist eine wertschöpfende Verwendung aller Daten aus dem Produktlebenszyklus durch Cyber-Physische Systeme gewährleistet. Es resultiert eine Zusammenarbeit aus den physischen Systemen als messende und handelnde sowie den Menschen als gestaltende und entscheidende Instanz. Bei beiden Instanzen liegt eine hohe Relevanz auf dem Aspekt der Kommunikation. Präskription wird durch Analytik in Form von Berechnungen aus Methoden der Big Data oder des maschinellen Lernens hergestellt. Reflektion und Datenbasis bildet der Digitale Schatten in Form eines Echtzeitmodells, welches wiederum auf cloudbasierten Plattformen vorgehalten wird. Die Datentransaktion wird durch Softwaredienste geregelt, sodass eine kontinuierliche Kommunikation mittels dieser Dienste und den entsprechenden Schnittstellen im Internet of Everything (IoE) erfolgen kann.

¹⁹⁶ Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik WGP e. V. 2016, S. 6.

Für ein vertieftes Verständnis wird auf die hierbei genannten Aspekte in Kapitel 4.2.1 näher eingegangen.

Aus den genannten Bausteinen lassen sich die Bereiche Interaktion und Interpretation von Daten zusammenfassen, die besonders zu betrachten sind. Darin sind einzelne Technologiefelder von Systemen inbegriffen, die in den entsprechenden Abschnitten erläutert werden.

4.2.1. Interaktion

Die Interaktion von Systemen via Daten umfasst im Wesentlichen die Bereiche Erfassung, Verarbeitung und Verwendung. Für jeden dieser Teilbereiche existieren wiederum unterschiedliche Technologien, die in der vorliegenden Arbeit aufgrund des Umfangs an zugehörigen Informationen nicht ganzheitlich dargestellt werden können. Eine diesbezüglich übergeordnete Thematik soll jedoch näher betrachtet werden: integrierte Systeme wie Cyber-Physische Systeme.

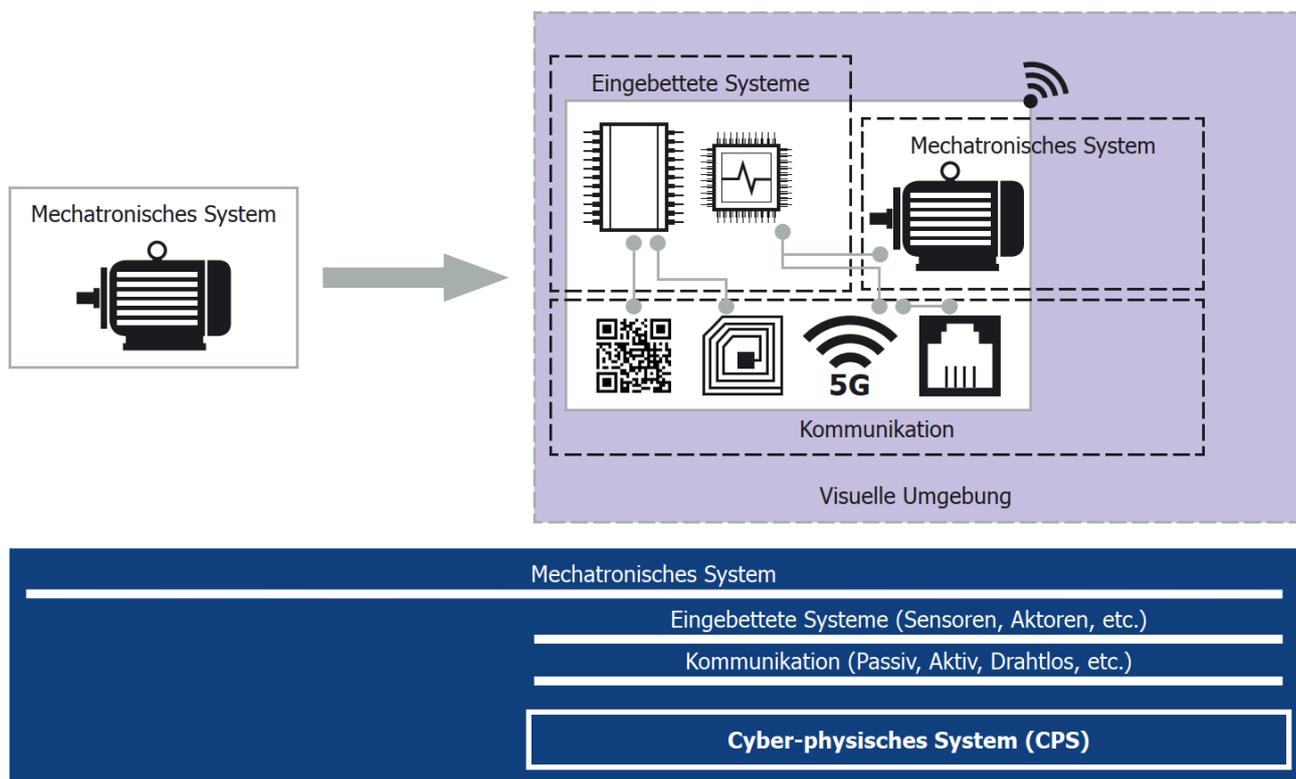


Abbildung 4-4: Elemente eines Cyber-Physischen Systems¹⁹⁷

¹⁹⁷ Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik WGP e. V. 2016, S. 10.

Die Thematik um CPS befasst sich grundlegend mit der Integration von Berechnungsmethoden in Prozesse physikalischen Ursprungs.¹⁹⁸ Dabei werden Cyber-Physische Systeme als Weiterentwicklung mechatronischer Systeme gemäß Abbildung 4-4 gesehen. Kern bilden diesbezüglich eingebettete Systeme wie Sensoren, Aktoren, etc. und etablieren dadurch die Interaktion der digitalen mit der realen Welt. Durch CPS können bspw. Zustandsdaten der mechatronischen Systeme erfasst und über unterschiedliche Datenverbindungen kommuniziert werden. Es handelt sich dementsprechend bei CPS um physische Artefakte¹⁹⁹, die von einem Computersystem in einem Netzwerk mittels Verbindung aus aktiver, passiver oder drahtloser Kommunikation überwacht, kontrolliert und koordiniert werden.²⁰⁰ Durch eine Verwendung von CPS können Bauprojekte von einem höheren Integrations- und Automatisierungsgrad profitieren. Bauunternehmen sind in der Lage ihre Ressourcen besser zwischen solchen Aufgaben zu verteilen, die entweder effizienter von Robotern, Drohnen oder Sensoren erfasst resp. ausgeführt werden können und denjenigen, die menschliche Expertise fordern.²⁰¹

Das Anwendungsspektrum bei CPS ist mannigfaltig. Das System aus Menschen, Maschinen, Produkten und Objekte besteht temporär, um gemeinsam eine Aufgabe, fachspezifisch auch *Task* genannt, zu erfüllen.²⁰² Dabei können Daten selbstständig und automatisiert erzeugt, verarbeitet, versendet oder empfangen werden. Je nach Bedarf kann sich ein solches System um zusätzliche CPS erweitern oder reduzieren, um wechselnde Anforderungen zu bearbeiten. Die Verbindungen zwischen den CPS erfolgt über Plattformen des sog. Internet der Dinge (IoT).^{203, 204} Dies stellt eine übergreifende Konnektivität für den Bedarf an kurzfristiger Wandlungsfähigkeit sicher. Innerhalb der CPS können jedoch die Informationen voneinander abweichen. GRALLA & LENZ führen in dieser Beziehung ein Beispiel auf, wonach das physische Äquivalent eines Feuermelders keine Informationen darüber benötige, wann eine Wartung anstehe. Er müsse lediglich vorhalten, welche Messungen er durchgeführt habe und welche Ergebnisse resultierten. In der virtuellen Repräsentation seien hingegen Informationen über den Zeitpunkt einer Wartung zwingend erforderlich.²⁰⁵ Durch die Verwendung der Informationen über manuelle Endgeräte, entstehen letztlich Cyber-Physische-Systeme auf einer soziotechnischen Basis, welche dem Menschen eine Interaktion mit dem jeweiligen System ermöglichen.²⁰⁶

Eine solche sozio-technische Umwelt bietet dem Menschen die Möglichkeit der Interpretation und Gestaltung der betrachteten Systeme im Bauprojekt. Für eine nähere Spezifizierung der

¹⁹⁸ Vgl. Lee & Seshia 2011, S. 12.

¹⁹⁹ Im Grundsatz sind Artefakte von Menschen erschaffene Objekte

²⁰⁰ Vgl. Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik WGP e. V. 2016, S. 10–11.

²⁰¹ Vgl. Boje, et al. 2020, S. 12.

²⁰² Vgl. Bitkom 2014, S. 19.

²⁰³ Vgl. Gralla & Lenz 2019, S. 692.

²⁰⁴ ITU 2012: Das Internet der Dinge (IoT) stellt eine globale Infrastruktur für die Informationsgesellschaft dar, die fortgeschrittene Dienste durch die Vernetzung von physischen und virtuellen Dingen auf der Grundlage bestehender und sich entwickelnder interoperabler Informations- und Kommunikationstechnologien ermöglicht.

²⁰⁵ Vgl. Gralla & Lenz 2019, S. 692.

²⁰⁶ Vgl. Engels 2020, S. 363.

Systeme kann somit deren Interaktion mittels CPS in drei Bereiche unterteilt werden, die nachfolgend näher erläutert werden: Erfassung, Verarbeitung und Verwendung.

Erfassung

Für die Betrachtung von baubetrieblichen und bauwirtschaftlichen Aspekten sowie deren Zusammenhänge werden zeitnahe und verlässliche Ergebnisse benötigt.²⁰⁷ Die Erfassung von Daten ist diesbezüglich unter den vorher genannten Bereichen der zum Zeitpunkt dieser Arbeit am weitesten untersuchte. Bei vertiefter Betrachtung lässt sich für jede der bisher genannten Technologien im Zuge der Datenerfassung ein spezifischer Zeitraum ermitteln, den die jeweilige Maschine benötigt, um einen Messvorgang durchzuführen. Diese Zeiträume haben sich im Laufe der letzten Jahrzehnte exponentiell reduziert.

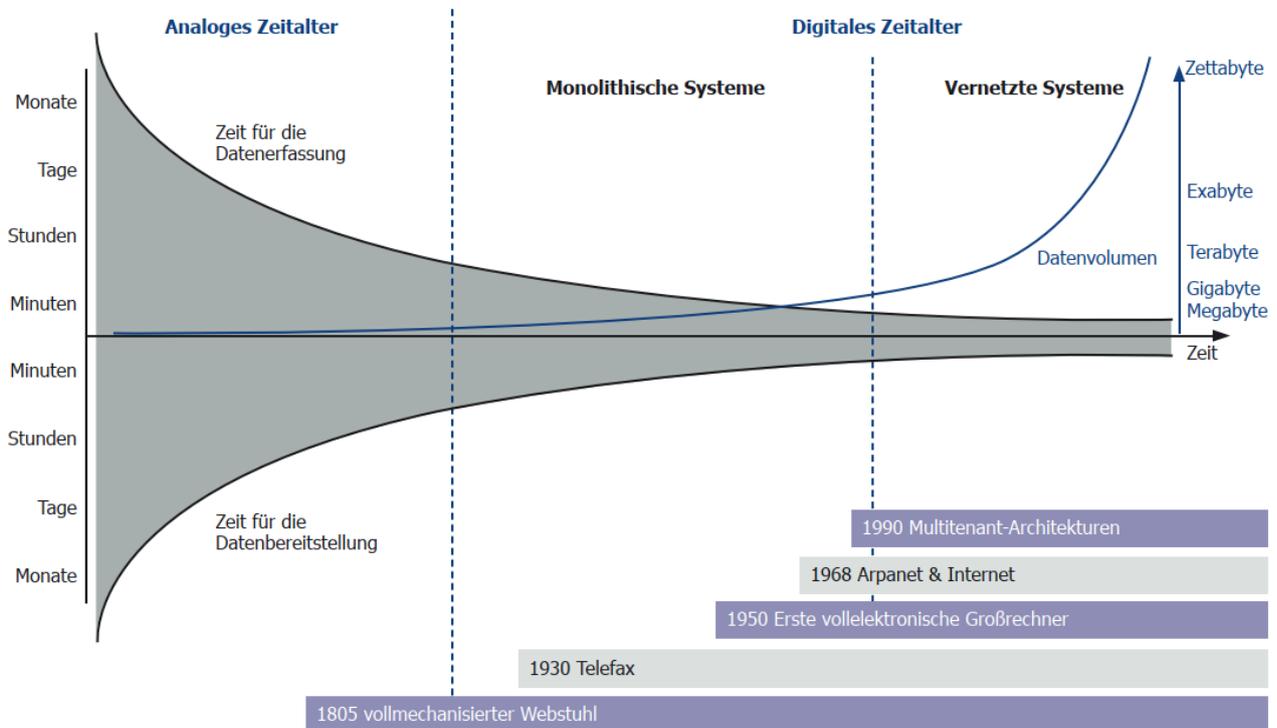


Abbildung 4-5: Zeitliche Einordnung des Digitalen Schattens²⁰⁸

In Abbildung 4-5 wird diesbezüglich die Verminderung des zeitlichen Aufwands der Datenaufnahme anhand zweier Zeitachsen dar. Die Abszisse stellt den Verlauf unterschiedlicher Zeitalter chronologisch dar. Diese reichen vom analogen ins digitale Zeitalter, wobei letzteres durch monolithische sowie vernetzte Systeme repräsentiert wird. Dem gegenüber steht einerseits die Or-

²⁰⁷ Vgl. Hofstadler 2019, S. E1-2.

²⁰⁸ Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik WGP e. V. 2016, S. 24.

dinate auf der linken Seite, welche die Aufnahme unbestimmter, jedoch gleichbleibender Datenmengen in Minuten, Stunden, Tage und Monate teilt. Im Verlauf der Zeitalter ist die erhebliche Reduzierung der Dauer der Erfassung der einzelnen Datenmengen erkennbar. Infolgedessen wird im vernetzten Zeitalter lediglich ein Bruchteil der Dauer aus den analogen Zeitaltern benötigt. Darüber hinaus stellt die Ordinate auf der rechten Seite das Datenvolumen mittels Byte-Variationen dar. Auffällig ist hierbei die wiederum exponentiell ablaufende Zunahme der Datenmengen im Verlaufe der Zeit. Zu bemerken ist ebenso die Steigung des Datenvolumens in vernetzten Systemen gegenüber der Reduzierung der Zeit für die Datenerfassung. Das Datenvolumen steigt ungleich stärker an. Dies kann seinen Ursprung in der stetig steigenden Leistungsfähigkeit der entwickelten Systeme in Kombination mit einer steigenden Verfügbarkeit von Datenspeicherplätzen durch Cloud Computing haben.

Nach HOFSTADLER braucht es im Allgemein für eine Ermittlung und Untersuchung von baubetrieblichen und bauwirtschaftlichen Aspekten und Zusammenhängen entsprechende Modelle, die zeitnah - im idealen Fall in Echtzeit - verlässliche Ergebnisse liefern.²⁰⁹ Aus diesem Grund sowie vor dem Hintergrund der Erkenntnisse aus den empirischen Untersuchungen in Kapitel 2.4, wird nachfolgend der Aspekt der Erfassung von Informationen innerhalb der Bauprojekte speziell vor dem Hintergrund des Einsatzes von Cyper-Physischen Systemen im Bauwesen betrachtet. Zu bemerken ist, dass ähnlich einem biologischen Organismus die Menge an Informationen bei einer kontinuierlichen Erfassung ausgesprochen hoch ist und daher das Konzept der Erfassung maßgeblich von den Sensorfähigkeiten und somit der Qualität der Sensorik abhängt.²¹⁰ Darüber hinaus stellt die Interoperabilität der Sensordaten und der Systeme untereinander eine große Herausforderung dar, die jedoch durch Einbeziehung des IoT als Rahmen für die Integration der Modelle und der Sensordaten gelöst werden kann.²¹¹

Bei einer Überwachung des Baufortschritts und dessen Automatisierung vor dem Hintergrund des Einsatzes von Cyper-Physischen Systemen im Bauwesen, können unterschiedliche Methoden zum Einsatz kommen. Dazu gehören unter anderem die aus der Geodäsie stammenden Methoden wie das Terrestrische Laserscanning (TLS) und die Photogrammetrie (SfM, Structured from Motion). Im Allgemeinen werden sich nach SCHNEIDER & KRAUS Geodäsie und Bauwesen durch ihren jeweiligen Beitrag zur digitalen Transformation weiter verschränken und verknüpfen.²¹² Bei beiden vorab genannten Methoden resultiert eine sog. Punktwolke²¹³ als Berechnungsergebnis. Sie kann genutzt werden, um den aktuellen Fortschritt des jeweiligen Projektes zu bewerten. Einerseits kann sie die Grundlage bilden, um daraus eine Echtzeitdokumentation zu erhalten. Zum anderen bildet sie die Grundlage für den Abgleich des geplanten mit dem realen Leistungsstand.

²⁰⁹ Vgl. Hofstadler 2019, S. E1-1.

²¹⁰ Vgl. Boje, et al. 2020, S. 7.

²¹¹ Vgl. Boje, et al. 2020, S. 7.

²¹² Vgl. Schneider & Kraus 18.09.2019, S. 29.

²¹³ Eine Punktwolke ist eine Menge von Einzelobjekten, Punkten, innerhalb eines dreidimensionalen Raumes. Die einzelnen Punkte können neben ihren jeweiligen Raumkoordinaten (X, Y, Z) zusätzliche Informationen wie bspw. Farbwerte enthalten. Die Menge an Punkten ist unstrukturiert

Die Photogrammetrie wird als die wirtschaftlichste und effektivste Technik unter den oben genannten Methoden zur Generierung von Punktwolke gesehen.²¹⁴ Eine Untersuchung der aktuellen Forschung von BOJE, et al. weist darauf hin, dass zwar der Einsatz des IoT als Mittel zur Erfassung von Sensordaten als obligatorisch angesehen wird. Dabei verbleiben indes die Genauigkeit der Sensoren und darüber hinaus die Interoperabilität mit den übrigen Komponenten der digitalen Modelle resp. der CPS weitgehend unerforscht.²¹⁵

Eine andere Methode der Überwachung ist eine polysensorale Erfassung des Zustands von Prozessen in Verbindung mit dem Prinzip des Lean Thinkings nach WEIL (2022). Darin wurde ein prozessorientiertes System generiert, mit dem eine automatisierten Erfassung, Verarbeitung und Dokumentation von Sensordaten in Echtzeit prototypisch umgesetzt werden konnte. Bei der prototypischen Umsetzung erfolgte eine kurzzyklische Kontrolle von Prozessen auf Grundlage sensorisch erfasster Daten in Echtzeit. Die daraus abgeleitete ebenfalls kurzzyklisch umgesetzte Steuerung der Prozesse steigerte die Prozesstransparenz und ermöglichte eine höhere Prozessqualität. Übergeordnetes Ziel bei diesem Forschungsprojekt war die Verbesserung der individuellen Arbeitssituation des arbeitenden Menschen.²¹⁶

Nach Betrachtung des aktuellen Stands des Forschungsraums sensorgestützter Erfassungsprozesse auf Baustellen, lässt sich bezogen auf geodätische Erfassungssysteme die regelmäßige Durchführung von Laserscans feststellen, durch deren Resultate entsprechende Modelldaten in Form von BIM-Planmodellen manuell aktualisiert werden. Bezogen auf die Erfassung mittels IoT-Funksystemen in Form von LoRaWAN-Netzwerktechnologie, lässt sich eine automatisierte Einbindung der Daten in ein Bauwerksmodell feststellen.

Es ist zu erkennen, dass auch für die Verwendung geodätischer Erfassungssysteme eine Verstehensumgebung benötigt wird, die es ermöglicht, das das Modell umgebende System zu begreifen und somit die notwendigen Prozesse abzubilden resp. die erforderlichen Abhängigkeiten im Detail zu berücksichtigen.²¹⁷ Eine solche Verstehensumgebung erhält man durch die Betrachtung der Modellbildung nach HOFSTADLER vor dem Hintergrund der Verwendung von CPS auf Basis der Methode der Digital Twin Construction (DTC) nach BOJE, et al. Diese Methode wird in Kapitel 4.4 dediziert behandelt. Kurz gesagt, es wird eine konsistente Datenumgebung für eine automatisierte Überwachung des Baufortschritts generiert, auf welcher Reaktionen in Echtzeit ermöglicht werden. Dadurch besteht die Möglichkeit der Reduzierung von Problemen, die bei der Validierung, bei der Interpretation und bei der effektiven Verarbeitung von erfassten Daten auftreten könnten. GRALLA & LENZ sprechen in dieser Konsequenz von einem System mit einer symbiotischen Beziehung zwischen realem und virtuellem Modell. Die Analytik bzw. Datenanalyseverfahren sind in diesem Zusammenhang von ausgesprochen hoher Bedeutung, da die Daten in der richtigen Form und zur richtigen Zeit von einem zu einem anderen System

²¹⁴ Vgl. Avsar, et al. 2008 sowie Mahami, et al. 2019.

²¹⁵ Vgl. Boje, et al. 2020, S. 7.

²¹⁶ Vgl. Weil 2022, S. 181 f.

²¹⁷ Vgl. Hofstadler 2019, S. E1-1.

übertragen werden müssen.²¹⁸ Um diesen analytischen Anforderungen zu genügen, sind die zugehörigen Herausforderungen vor allem auf den Baustellen zu lösen. Bei einer automatisierten Überwachung des Baufortschritts bestehen besondere Herausforderungen bei Ausstattung und Warten von Baustellensensoren. Die Baustelle als eine Produktionsstätte weist eine erhöhte Verschmutzungs- und Verschleißgefahr auf, welche es zu beachten und entsprechend zu behandeln gilt. Kann indes eine fehlerfreie Funktionalität der Sensoren wie bei WEIL sichergestellt werden, wird wiederum eine hohe Menge an Daten produziert, die entsprechend in die Modelle eingebunden werden müssen.²¹⁹

Werden die genannten Anforderungen eingehalten, so können unterschiedliche Mehrwerte innerhalb der Projekte generiert werden. Abgleich und Verknüpfung von Daten aus verschiedenen Geräten und Modellen bringen wertvolle Erkenntnisse bspw. in der Datenvisualisierung in Echtzeit. Diese hat in einer Vielzahl von Projekten eine hohe Relevanz und bildet eines der Kernelemente von Kommunikation und Entscheidungsfindung. Eine für die vereinfachte Verwendung von Daten in Echtzeit notwendige Aufbereitung wird durch entsprechende Algorithmen erreicht. Diese strukturieren und prozessieren die großen Datenmengen und ermöglichen auf diese Weise eine Gegenüberstellung sowie den resultierenden Vergleich der digitalen Abbilder von u.a. dem Leistungsprozess, dem Bauwerk an sich sowie der Ressourcen als Baufortschritt auf der Baustelle mit dem geplanten Bauablauf in Echtzeit.²²⁰ Dies kann für eine Bewertung von bereits abgeschlossenen Leistungen herangezogen werden.

Es sei angemerkt, dass bisher vermehrt die Verwendung der Erfassungsinformationen als qualitative Daten dargestellt wird. Jedoch sind über die Qualität der Modelle in Form geometrischer Informationen ebenso kontextbezogene Informationen in Form von Attributen ausschlaggebend. Diese sind für eine detailgetreue Erfassung eines zu untersuchenden Bauobjekts ebenfalls der Analyse hinzuzuziehen.

Datenverarbeitung

Die in Abbildung 4-3 dargestellten Bausteine der Industrie 4.0 stellen Resultate aus den gesamten technologischen Entwicklungen der vergangenen Jahrzehnte dar. Ein Großteil der Bausteine basiert auf dem Zusammenspiel einzelner technologischer Entwicklungsschritte. Notwendig diesbezüglich war und ist die jeweilige Vernetzung. Die neueren Entwicklungen basieren wiederum auf dem Internet der Dinge (IoT, Internet of Things), ferner auf dem Internet of Everything. Letzteres ist eine Vergrößerung des Einzugsbereiches des IoT um die Vernetzung von unter anderem Menschen, Maschinen, Ressourcen, Diensten und Dingen. Es lässt sich schluss-

²¹⁸ Vgl. Gralla & Lenz 2019, S. 692.

²¹⁹ Vgl. Boje, et al. 2020, S. 11.

²²⁰ Vgl. Boje, et al. 2020, S. 11.

folgern, dass nicht die Digitalisierung der jeweils einzelnen Entitäten das Revolutionäre an Industrie 4.0 darstellt, sondern die Möglichkeit der Vernetzung aller entsprechenden technischen Systeme in Echtzeit.²²¹

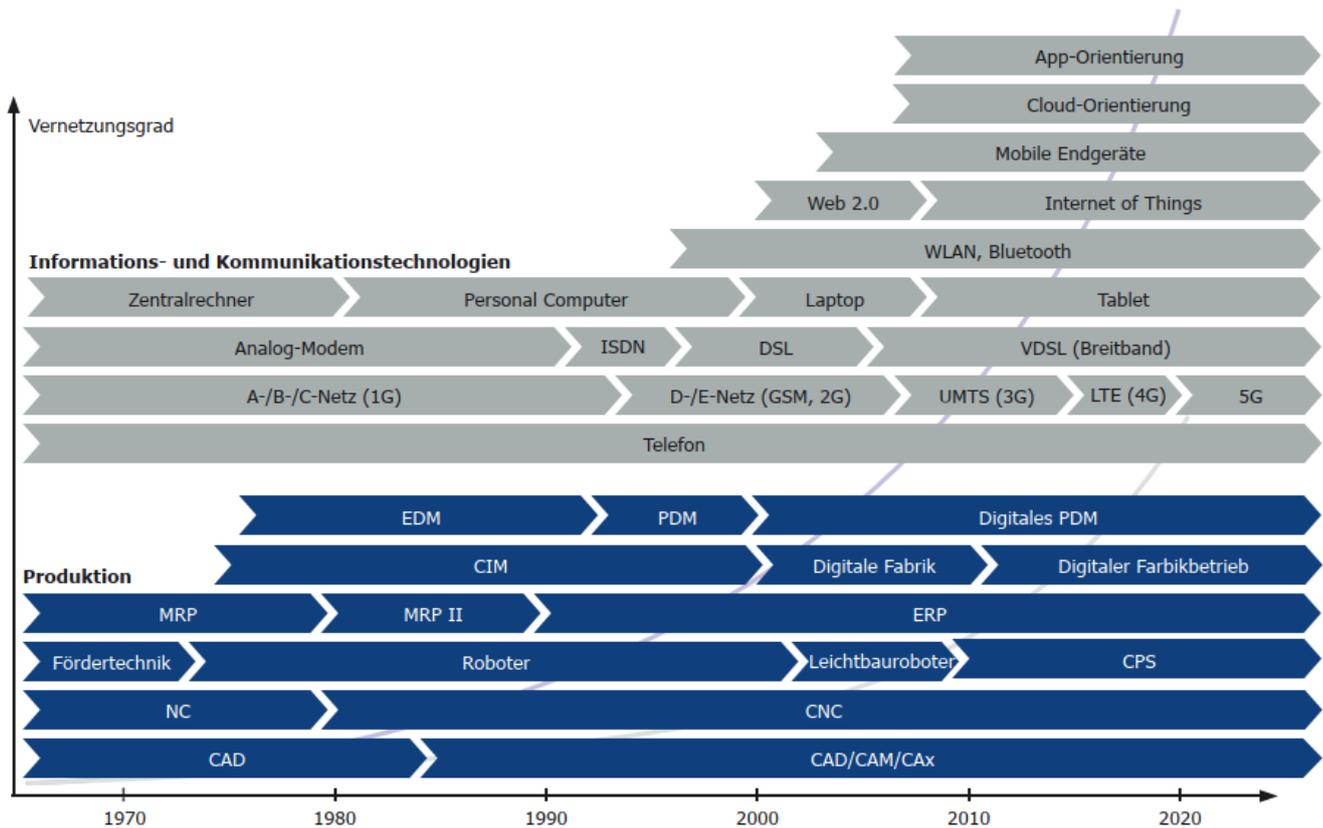


Abbildung 4-6: Die Digitalisierung der Produktion und IT-Technologie im Zeitverlauf²²²

Der Verlauf der Zunahme des durch die Verknüpfung erreichten Vernetzungsgrades wird in Abbildung 4-6 deutlich. In dieser Hinsicht wird der chronologische Verlauf als Abszisse dem Vernetzungsgrad der technischen Systeme als Ordinate gegenübergestellt. Dargestellt sind technologische Weiterentwicklungen der letzten 50 Jahre sowohl aus der Produktion als auch aus der Informations- und Kommunikationstechnologie. In letzterer kann erkannt werden, dass immer kleinere, jedoch leistungsfähigere Recheneinheiten wie die Entwicklung vom Zentralrechner über den Personal Computer, den Laptop bis hin zu einem Tablet produziert werden. In einer Kombination mit einerseits der Weiterentwicklung vom Analog-Modem hin zu VDSL und der Neuentwicklung des WLAN sowie andererseits den LTE (4G) resp. 5G-Standards wird dadurch ein hoher Vernetzungsgrad erreicht. Dieser ist in der Kurvendarstellung im Hintergrund dargestellt. Im Bereich der Produktion steigt der Vernetzungsgrad ebenfalls an, jedoch

²²¹ Vgl. Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik WGP e. V. 2016, S. 6.

²²² Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik WGP e. V. 2016, S. 7.

zeitlich verzögert. Technologische Entwicklungen wie CAD/CAM/CAx sind zwar bereits seit langem entwickelt, ihr Vernetzungsgrad erreicht jedoch noch nicht den Wert, der Informations- und Kommunikationstechnologie. Mit Entwicklung der CPS aus der Fördertechnik, den Robotern und anschließend den Leichtbaurobotern, nimmt äquivalent diejenige Datenmenge zu, die übertragen werden kann, jedoch auch muss. Dies lässt sich ebenfalls in Abbildung 4-5: Zeitliche Einordnung des Digitalen Schattens erkennen. Es wird dargestellt, wie sich die Dauer der Erfassung von Datenmengen reduziert, ihr Volumen jedoch darüber hinaus stärker anwächst. Durch Entwicklung der WLAN-Technologie sowie die 4G- und 5G-Standards wird eine Datenübertragung hoher Datenmengen mit geringer Latenz ermöglicht.

Die auftretenden Datenmengen sind nicht nur zu erfassen, sie sind ebenso zu verarbeiten. Diesbezüglich sind die Daten an den entsprechenden Verarbeitungsort zu transferieren. Das sog. *Cloud Computing* kann dabei eingesetzt werden. Es bezeichnet die Bereitstellung von IT-Diensten, Anwendungen und Daten über das Internet. Die Berechnungen befinden sich somit an einem anderen Ort als das Endgerät, das den Zugriff ausführt. Das bedeutet, dass der physische Standort des Servers oder Speichers, auf dem die Berechnungen erfolgen, von den Anwendenden nicht notwendigerweise berücksichtigt werden muss, da die Dienste über das Internet sowie die Hardware und Systeme in den Rechenzentren bereitgestellt werden.²²³

Im Zuge der digitalen Transformation bei Bauprojekten hat sich der Term Common Data Environment (CDE) als Bezeichnung für einen Online-Speicher durchgesetzt. Diese digitale Plattform wird als gemeinsame Datenablage resp. Projektverwaltung verwendet und ermöglicht einen kontinuierlichen Datenaustausch innerhalb der Projektbeteiligten. Am Ende eines Projektzeitraums kann die CDE als Archivierungsplattform für eben dieses Projekt und alle zugehörigen Projektinformationen dienen. Ein Kernelement moderner CDE bilden Algorithmen, die über sog. Metadaten der Projektdokumente eine teilautomatisierte Ablage entsprechend einer unter den Projektbeteiligten gemeinsam festgelegten Nomenklatur und Projektstruktur ermöglichen.²²⁴

Bei Aufnahmen von Terrestrischen Laserscans auf Baustellen kann jedoch die Menge an Daten in einem sehr kurzen Zeitraum eklatant zunehmen, sodass ein Abgleich in Echtzeit über übliche Datenleitungen oder mobile Datenverbindungen nicht geleistet werden kann. Die ausführende Person auf der Baustelle müsste Wartezeiten in Kauf nehmen, in denen die Daten zu den zentralen Speicherorten transferiert würden. In solchen Fällen können unterschiedlichen Methoden zum Einsatz kommen. *Edge-Computing* ermöglicht die Verarbeitung von Daten und Diensten nicht an den zentralen Verarbeitungsstellen eines Netzwerks, die Daten werden hingegen an dessen Rand, sprich zu der Datenquelle verlagert.²²⁵ Die erfassten Daten werden sozusagen auf den mobilen Endgeräten vor Ort prozessiert und nur die bereits berechneten Ergebnisse werden zu den zentralen Datenspeichern übertragen. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit der Verwendung des *Fog Computing*. So werden Cloud-Dienste bezeichnet, bei denen Sensoren und andere angeschlossene Geräte wie z. B. Kameras Daten an ein nahegelegenes Edge-Computing-

²²³ Vgl. Sehgal & Bhatt 2018, S. 2.

²²⁴ Vgl. Borrmann, et al. 2019, S. 2.

²²⁵ Vgl. Shen, et al. 2020, S. 366.

Gerät senden, welche über die entsprechende Rechenleistung verfügt, sodass dort diese Daten analysiert werden. Anschließend werden die Ergebnisse an die Cloud transferiert.²²⁶

Für Prozesse dieser Art, unabhängig der Cloud-, Edge, oder Fog-Computing-Methode, wird ein kontinuierlicher Datenfluss benötigt, um Daten auszuwerten und so aufzubereiten, dass sie für den täglichen Gebrauch verwendet werden können. Da die Daten in einer maschinenlesbaren Form übermittelt werden, ist eine automatisierte Auswertung möglich, worauf eine Entscheidungsfindung durch Menschen oder Methoden der Künstlichen Intelligenz erfolgen können.²²⁷ Vorteile der Verwendung automatisch aufgenommener Daten für das Bauwesen ist nach der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Produktionstechnik WGP e.V. unter anderem die Informationsverfügbarkeit. Es wird ein ortsungebundener Zugriff auf die erhobenen Daten als einzige Datenquelle ohne Redundanzen erreicht, woraus eine hohe Konsistenz der Daten resultiert. Wird jedoch nach Anforderungen an diese Daten und deren Verarbeitung eine ortsgebundene Datenspeicherung notwendig, so erfolgt die Verarbeitung der Daten an demselben Ort und es werden ausschließlich die Ergebnisse für die weitere Verarbeitung genutzt. Die Menge an zu übertragenden Daten wird reduziert und die Verfügbarkeit der notwendigen Ergebnisse wird somit beschleunigt. Es resultiert darüber hinaus eine hohe Verarbeitungsgeschwindigkeit, da eine Vielzahl an Dateninput simultan prozessiert werden kann. Diesbezüglich ist jedoch das Vorhalten entsprechender Hardware vor Ort notwendig, um die aufgenommenen Informationen zu prozessieren. Auf diesem Weg erreicht man zusätzlich hohe Informationsreliabilität und Datensicherheit. Fehleingaben, Manipulation und Übertragungsfehler können hierbei reduziert und ein Zugriff unbefugter externer kann unterbunden werden.²²⁸

Verwendung

Stehen Resultate aus den entsprechenden Prozessen der Datenverarbeitung zur Verfügung, so können diese weiterverwendet werden. Eine Vielzahl wissenschaftlicher Untersuchungen, die sich mit der Verwendung von sensorischen Aufnahmen als Quelle von Echtzeitdaten auf den Baustellen beschäftigen, beschreibt jedoch lediglich die Arten der Sensornetzwerke, die Herausforderungen bei der Verwendung, die Einbindung der Sensoren mittels IoT sowie mögliche Anwendungsszenarien. Eine Verwendung wie bspw. die Überführung der Daten in digitale Modelle resp. der Abgleich der Daten zwischen virtuellen und physischen Modellen wird hingegen nicht beschrieben.²²⁹

²²⁶ Vgl. Sehgal & Bhatt 2018, S. 181.

²²⁷ Vgl. Boje, et al. 2020, S. 7.

²²⁸ Vgl. Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik WGP e. V. 2016, S. 24.

²²⁹ Vgl. Boje, et al. 2020, S. 7.

4.2.2. Interpretation

Der zweite der Bereiche, die aus den Bausteinen der Industrie 4.0 gemäß Abbildung 4-3 abgeleitet werden können, ist die Interpretation von Daten. Vor dem Hintergrund von baustellenbezogener Interpretation können folgende Aussagen getroffen werden.

Sofern eine ganzheitliche und verbesserte Baustellenüberwachung erfolgen soll, ist der Umgang mit entsprechend großen Datenmengen notwendig. BOJE, et al. sprechen diesbezüglich von „Ertrinken in Daten“²³⁰. Innerhalb dieser Betrachtungsweise, ergeben sich zwingendermaßen Anwendungsszenarien, bei denen ein verstärkter Einsatz von Methoden des maschinellen Lernens resp. der Künstlichen Intelligenz notwendig wird. In dieser Hinsicht ist eines der Ziele, wertvolle Erkenntnisse aus dem Abgleich und der Verknüpfung von Daten aus verschiedenen Sensoren sowie Modellen zu erhalten. Kommt eine Verwendung von stärker integrierten, komplexen System zum Einsatz, werden Anforderungen gestellt, sodass zukünftige Bauprojektsysteme in der Lage sein sollen, Planungs- und Kosteninformationen automatisch an die Dynamik auf der Baustelle anzupassen, die richtigen Algorithmen für eine annähernd korrekte Prognose zu verwenden und letztendlich die Projektleitung durch rechtzeitige Warnungen über Störungen und deren mögliche Ursachen zu informieren. Dass stets die passenden Algorithmen verwendet werden und diese darüber hinaus fehlerfreie Prognosen erstellen, ist eine Bedingung, die von vielen Baupraktikern gestellt wird. Entgegen dessen bestehen dennoch Zweifel an der Konsistenz der Algorithmen. Die Vollständigkeit sowie die Gültigkeit der BIM-Daten während der Bauphase werden häufig infrage gestellt. Obwohl nach Ansicht des Verfassers dieser Arbeit eine gewisse Skepsis gegenüber den Ergebnissen algorithmischer Berechnungen durchaus beibehalten und entsprechend Probeberechnungen durchgeführt werden sollten, kann die automatische Einbindung von Sensorik und nachgelagerte automatische Berechnung zu einer Überwindung der genannten Skepsis führen. Bei einer automatisierten Reflektion des Bau-IST durch Cyber-Physische Systeme innerhalb der BIM-Daten, könnte den Baustellenteams eine Möglichkeit eröffnet werden, alternative Planungssimulationen durchzuführen, die sowohl Bauaufgaben als auch temporäre logistische Aktivitäten oder die Planung des Geräteinsatzes umfassen.²³¹

Um das Ziele zu erreichen, wertvolle Erkenntnisse aus dem Abgleich von Daten aus verschiedenen Sensoren mit Modellen zu erhalten, ist die Interpretation der Daten zwingend erforderlich. Dabei entwickeln sich der Zugang und die Nutzung solcher Massendaten mit Hilfe spezifischer Methoden und Algorithmen zur elementaren Basis zukünftiger Engineering-Prozesse.²³² Für den Umgang mit solchen Massendaten wird eine entsprechende Form von Datenanalyse notwendig. Diese Analytik wird als Gesamtheit aller Verfahren und Methoden gesehen, wonach aus den verfügbaren Daten möglichst automatisch Muster innerhalb der Datensätze erkannt werden. Dadurch sollen Zusammenhänge zwischen zugrunde liegenden Prozessen abgeleitet werden

²³⁰ Remund & Aikat 2012: „Drowning in Data“

²³¹ Boje, et al. 2020, S. 7.

²³² Vgl. Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik WGP e. V. 2016, S. 32.

können. Es lassen sich daraus wiederum Handlungsempfehlungen ableiten, um Geschehnisse zu verstehen und verbessern zu können.²³³

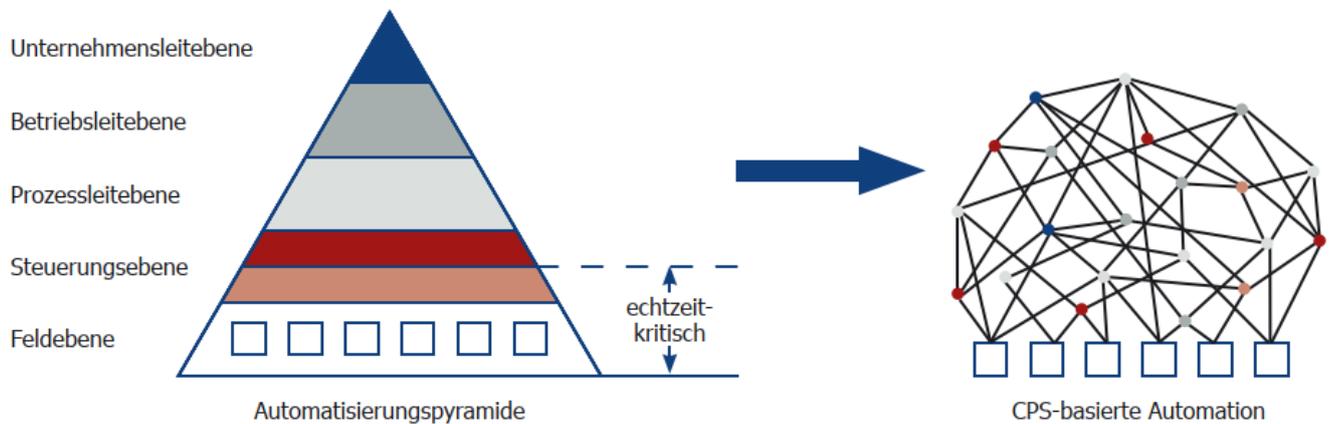


Abbildung 4-7: Auflösung der Automatisierungspyramide²³⁴

Durch eine automatisierte Ableitung solcher Handlungsempfehlungen muss nicht länger zwangsweise auf die konventionelle Automatisierungspyramide gemäß Abbildung 4-7 zurückgegriffen werden.²³⁵ Entsprechende Entscheidungen sind somit nicht länger über alle Ebenen hinaus zu transportieren, um ggf. die jeweilige Meinung der Prozessleitenebene, der Betriebsleitenebene sowie der Unternehmensleitenebene einzuholen. Viel mehr können im Sinne der im rechten Teil der Abbildung dargestellten CPS-basierten Automation bei echtzeitkritischen Themen flexible und autonome Systeme äquivalent zu den Cyber-physischen Produktionssystemen aus der Industrie 4.0 kommunizieren und situationsspezifische Entscheidungen treffen.²³⁶

Einen hierbei hervorzuhebenden Aspekt, stellt die Zuverlässigkeit der Quelldaten dar. Auf diesen ist besondere Sorgfalt zu legen. Es muss zwischen Vorhersagen, die auf realen Sensordaten beruhen und solchen, die auf simulierten Sensordaten oder einem gemischten Ansatz basieren, unterschieden werden. Die Verifizierung der Gültigkeit der Vorhersage und ihrer Auswirkungen auf den physischen Teil des Bauwerks sind zu berücksichtigen. BOJE, et al. stellen diesbezüglich die Frage, ob die derzeitigen KI-Methoden intelligent genug seien, um für die jeweilige Frage brauchbare Entscheidung zu treffen.²³⁷ Dabei wird angeführt, ein Algorithmus fände zwar Antworten schneller als ein Mensch, jedoch nur mit einer Sicherheit von 80%.²³⁸

²³³ Vgl. Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik WGP e. V. 2016, S. 32.

²³⁴ Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik WGP e. V. 2016, S. 11.

²³⁵ Vgl. Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik WGP e. V. 2016, S. 11.

²³⁶ Vgl. Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik WGP e. V. 2016, S. 11.

²³⁷ Vgl. Boje, et al. 2020, S. 9.

²³⁸ Vgl. Bitkom 2017, S. 59.

Einen ähnlichen Standpunkt geben SACKS, et al. an. Bei der automatisierten Überwachung von Projektleistungen gebe es viele Insellösungen. Dabei werden nur wenige Datenerfassungstechnologien genutzt, die wiederum nicht verknüpft seien. Mitgelieferte Daten aus der Interpretation seien nicht immer zuverlässig. Sie müssten manuell überprüft und nachbearbeitet werden. Die Resultate seien infolgedessen nur eingeschränkt vertrauenswürdig und verwendbar.²³⁹

Die Eliminierung dieser Beschränkungen resp. der beschriebenen Unsicherheit kann durch die Einbeziehung von Menschen erreicht werden. Dieser Umgang mit Wissen, das aus Massendaten extrahiert und durch eine gemeinsame Lösungsfindung von Menschen mit Maschinen unterstützt wird, wird auch Augmented Intelligence genannt.²⁴⁰ Die Forschung im Bereich der Augmented Intelligence als Ergänzung zur Künstlichen Intelligenz geht davon aus, dass sich menschliche und computergesteuerte kognitive Technologien im Idealfall positiv ergänzen.²⁴¹

Den gesamten vorab genannten technologischen Aspekten liegt eine Gemeinsamkeit zugrunde. Sie alle benötigen Modelldaten in einer maschinenlesbaren Form. Diese kann in Form Digitaler Abbilder erfolgen, welche nachfolgend beschrieben werden.

²³⁹ Vgl. Sacks, et al. 2020b, S. 4.

²⁴⁰ Vgl. Carter & Nielsen 2017.

²⁴¹ Vgl. Kirste 2019, S. 58.

4.3. Digitale Abbilder

Die digitale Transformation ermöglicht die umfassende Integration digitaler Technologien in das tägliche Leben der Menschen. Dies führt zu einer erhöhten Erzeugung, Verwendung und Speicherung digitaler Artefakte aller denkbaren Arten.²⁴² Man erhält folglich solche Informationen, die von Personen unterschiedlicher Interessensbereiche verwendet werden sollen und daher einen umfangreichen und variierenden Datenbestand aufweisen. Dieser kann beispielsweise zur Vorhersage des Verhaltens von Prozessen herangezogen werden. Betrachtet man einzelne Wirtschaftsbereiche, so gehen daraus diverse Arten von Simulationen mit mehr oder weniger weit fortgeschrittener Informationslage hervor. In der produzierenden Industrie werden hoch automatisierte Anlagen mit entsprechender Sensorik ausgestattet, die eine Vielzahl der ablaufenden Prozesse erfassen. Die aufgenommenen Daten werden zur Auswertung an zentrale Rechenzentren weitergeleitet. Je nach Umfang der sensorischen Aufnahme und Verarbeitung der generierten Daten, reagieren die Systeme in entsprechender Geschwindigkeit. Um umfassend und schnell auf Änderungen reagieren zu können, ist es für digitale Systeme unabdingbar, ganzheitlich autonom zu arbeiten.²⁴³

Solche autonomen Systeme werden bei ROSEN, et al. als sog. Digitale Zwillinge verstanden. Sie sind intelligente Maschinen, die Aufgaben ohne detaillierte Programmierung und ohne die Kontrolle von Menschen ausführen. Funktionalitäten sind in der jeweiligen Programmierung eingebettet. Der aktuelle Zustand des jeweiligen Systems ist zu jeder Zeit bekannt.²⁴⁴ Für die Terminologie Digitaler Zwilling existiert allerdings nach KRITZINGER, et al. bis dato keine einheitliche Definition, es existieren lediglich Konzepte.²⁴⁵ Auch diese werden wiederum innerhalb aller Industriezweige unterschiedlich betrachtet und entsprechend interpretiert. Es existieren diesbezüglich wiederum unterschiedliche Detaillierungsstufen in der Verwendung der benannten Konzepte. Bei einem Teil der im Kontext der vorliegenden Arbeit betrachteten Konzepte gehen die jeweiligen Autorinnen und Autoren davon aus, dass digitale Modelle künftig nicht weiterhin als eine Abstraktion des realen Bauwerks im Sinne der allgemeinen Modelltheorie nach STACHOWIAK (1973) zu sehen sind.²⁴⁶ Dieser Teil der Definitionen des Digitalen Zwillings basiert auf der Annahme, dass sich eine möglichst genaue virtuelle Abbildung eines realen Objekts generieren lässt. Hingegen definiert ein anderer Teil den Digitalen Zwilling als ein ideales, jedoch unerreichbares Ziel, da ein virtuelles Abbild niemals ganzheitlich ein physisches Objekt resp. System widerspiegeln kann.²⁴⁷

Keine der beiden Thesen wird im Zuge dieser Arbeit bestätigt oder widerlegt werden können. Hingegen wird eine Approximation Digitaler Modelle an reale Objekte vor dem Hintergrund der Verbesserung der Abwicklung von Bauprojekten angestrebt. Es ist jedoch notwendig dieser Arbeit eine hinreichende Definition der unterschiedlichen Begrifflichkeiten Digitaler Abbilder vor

²⁴² Vgl. Rosen, et al. 2015, S. 568.

²⁴³ Vgl. Rosen, et al. 2015, S. 567.

²⁴⁴ Rosen, et al. 2015, S. 567.

²⁴⁵ Vgl. Kritzinger, et al. 2018, S. 1020.

²⁴⁶ Vgl. Stachowiak 1973.

²⁴⁷ Vgl. Boje, et al. 2020, S. 3.

dem Hintergrund der Abgrenzung oder Einbeziehung der Methode BIM zugrunde zu legen. Diesbezüglich werden nachfolgend unterschiedliche Sichtweisen auf verschiedene Begriffe für Digitale Abbilder aus dem aktuellen Stand der Forschung dargestellt.

4.3.1. Building Information Modeling

Die bekannteste Form einer digitalen Abbildung im Bauwesen sind Modelle auf Basis der Methode des Building Information Modeling. BIM ist nach BUILDINGSMART DEUTSCHLAND E. V. eine zeitgemäße Arbeitsmethode für das Planen und Realisieren von Bauvorhaben und basiert auf der aktiven Vernetzung von Projektbeteiligten eines Bauprojektes.²⁴⁸ Die Leistungen innerhalb von Projekten werden auf Basis von Datenmodellen erbracht. Diese Datenmodelle bestehen zum größten Teil aus objektorientierten geometrischen Informationen, die häufig für die menschliche Interpretation visuell im Sinne eines dreidimensionalen virtuellen Modells aufbereitet sind. Darüber hinaus werden die Modelle mit zusätzlichen nicht Geometrie abhängigen Informationen, sprich semantischen Informationen angereichert, um unterschiedlichen Anforderungen aus dem Projektgeschäft zu entsprechen. Beispiele für solche nicht Geometrie abhängige Informationen sind unter anderem Materialien, Zeit- und Kosteninformationen sowie Verlinkungen zu anderen Elementen. BIM bildet einen Informationsrahmen, durch den organisatorische Grenzen innerhalb von Projekten überwunden werden. Technische Innovationen im Bauwesen werden durch die Methode BIM unterstützt, indem eine Brücke zwischen informationsintensiven technologischen Innovationen und traditionell informationsarmen und fragmentierten Bauprojektorganisationen geschlagen wird.²⁴⁹ An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass nachfolgend keine grundlegenden Informationen zur Methode BIM gegeben werden. Bei Bedarf ist aktuelle Literatur heranzuziehen.

Die Verwendung sog. BIM-Modelle und der zugehörigen Arbeitsprozesse ist im Bauwesen noch nicht in allen Projekten umfassend umgesetzt, viele Projekte werden weiterhin konventionell abgewickelt. Je weiter jedoch die technische Entwicklung fortschreitet und dementsprechend die Verwendung digitaler Prozesse erleichtert wird, umso vermehrt werden einzelne Aspekte der Methode BIM im Verlauf von Projekten eingesetzt. Informationen aus der Forschung und der Industrie zeigen auf, dass über sogenannte Anwendungsfälle²⁵⁰, wie unter anderem Bestandsmodellierung, Logistikplanung oder Baufortschrittskontrolle hinaus weitere Informationen aus Prozessen, Methoden oder Arbeitsweisen wie bspw. Lean Construction, Qualitätssicherung, Health & Safety-Aspekte in die jeweiligen Modelle einbezogen werden. So stellt die Verwendung der BIM-Methode hohe Anforderungen an die Interoperabilität von digitalen Modellen. Einige dieser Anforderungen wurden bereits von kommerziellen Anbietern erfüllt, indem eine möglichst Informationsverlust arme Integration durch Import- resp. Exportfunktionen von einer Softwarelösung zu einer anderen ermöglicht wird. Hieraus kann zügig eine Überforderung

²⁴⁸ Vgl. buildingSMART Deutschland e. V.

²⁴⁹ Vgl. Sacks, et al. 2020b, S. 2.

²⁵⁰ Vgl. Borrmann, et al. 2019, S. 8.

der Systeme sowie deren Anwenderinnen und Anwender resultieren, da die Anzahl der Werkzeuge und Plattformen, die von den Projektbeteiligten verwendet werden, stetig zunimmt. Der IFC-Standard wurde explizit entwickelt, um solche Interoperabilitätsprobleme zu reduzieren. Obwohl sich das IFC-Schema in den letzten Jahren erheblich weiterentwickelt hat, ist das Problem der Interoperabilität noch immer nicht vollständig gelöst. Es wurde für die Übertragung von Modelldaten von einer Software zu einer weiteren entwickelt und nicht für den Zweck manuelle oder dynamische Veränderungen durchzuführen.²⁵¹

Die genannten Erweiterungen führen zu einer stetig steigenden Datenmenge, die innerhalb der Modelle eingebunden und verarbeitet werden müssen. Auch über Aufnahmeprozesse durch Sensorik oder andere Technologien steigt die Datenmenge. Hinzu kommen die immer geringer werdenden Zeitabständen, in denen diese Daten zur Verfügung stehen und verarbeitet werden müssen. Durch eine solche Verfügbarkeit, Verarbeitung und letztendlich Interpretation der Daten ist die Verwendbarkeit digitaler Prozesse bei Projekten im Allgemeinen frühzeitig zu bedenken, zu planen und festzulegen. Dabei wird teils festgestellt, dass einzelne Technologien oder Methoden nicht miteinander kompatibel sind. So ist die aktuell gebräuchliche Verwendung der Methode BIM aufgrund gebräuchlicher Datenstands und teils noch unzureichend entwickelter Cloud-Standards nicht umfangreich kompatibel mit Prozessen und Datenmengen des IoT.²⁵² Darüber hinaus besteht nach SACKS, et al. eine schwerwiegende Problemstellung im Hinblick auf die zukünftige Einbeziehung von Methoden der Künstlichen Intelligenz in der Aufteilung der in einem Projekt genutzten Modelle nach der Semantik verschiedener Gewerke resp. Disziplinen. Es werden separate Modelle für unter anderem Architektur, Tragwerksplanung oder der technischen Gebäudeausrüstung erstellt und gepflegt. Eine Verknüpfung erfolgt durch das Referenzieren der Modelle ineinander. Hieraus entsteht jedoch eine Problematik der impliziten Informationshaltung. Für eine Verwendung der semantischen Informationen für Methoden der Künstlichen Intelligenz sind die Informationen explizit vorzuhalten, sodass eine separate Interpretation der Zusammenhänge durch Menschen ausgeschlossen werden kann. Für ein Hinzufügen expliziter semantischer Informationen an das jeweilige Fachmodell sollten diese einzeln angesteuert werden können. Zukünftig können diesbezüglich Methoden der sog. semantischen Anreicherung eingesetzt werden. Nach SACKS, et al. ist diese Technologie indes zum aktuellen Stand ein recht neues Forschungsgebiet und in der Literatur noch nicht häufig diskutiert. Sollte die Entwicklung fortschreiten und eine semantische Anreicherung der Objekte innerhalb der Modelle umfangreich möglich sein, so könnte das größte Problem der BIM-Interoperabilität gelöst werden. Modelle könnten für jeden Anwendungsfall entsprechend erweitert werden und besäßen folglich standardisierte und allgemeingültige Datensätze.²⁵³ Daraus ließe sich folgern, BIM-Modelle könnten als Digitale Schatten oder Zwillinge eingesetzt werden. Dieser Aspekt ist jedoch rein spekulativ und bisher geringfügig untersucht.

²⁵¹ Vgl. Boje, et al. 2020, S. 2.

²⁵² Vgl. Boje, et al. 2020, S. 2.

²⁵³ Vgl. Sacks, et al. 2020b, S. 6.

4.3.2. Digitaler Schatten und Digitaler Zwilling

Nachfolgend wird eine differenzierte Betrachtung ausgewählter Definitionen für Digitale Abbilder gegeben. Der jeweilige Detaillierungsgrad der verwendeten Definitionen ist unterschiedlich. Es existieren sowohl allgemein gehaltene als auch detailliert beschriebene Darstellungen. Dabei besteht ein Großteil der Definitionen vor dem Hintergrund des verarbeitenden Gewerbes. Dort werden anderweitige Modelle, Werkzeuge und Technologien verwendet, als es bisher im Baugewerbe der Fall ist. Nach BOJE, et al. sollte es jedoch ein übergeordnetes Ziel sein, eine Gesamtarchitektur sowie Funktionalitäten zu haben, die allgemeingültig und nicht auf einzelne Wirtschaftszweige beschränkt sind.²⁵⁴

In einer vermehrt allgemeinen Betrachtungsweise beschreibt ENGELS die Digitalen Abbilder, bestehend aus Digitalem Fußabdruck, Digitalem Schatten und Digitalem Zwilling, auf Basis soziotechnischer Systeme. Diese bestehen wiederum aus Menschen, Maschinen und deren Interaktionen. Die Maschine nimmt dabei die technische Komponente ein und der Mensch, der die Maschine bedient, die soziale.²⁵⁵

Der Digitale Fußabdruck wird in dieser Definition als eine Summe von Daten beschrieben, die nicht eindeutig Maschinen oder Menschen zugeordnet werden können und daher im Allgemeinen keine Identifizierbarkeit aufweisen. Bei einem Digitalen Schatten können die Daten konkret einer Maschine oder einem Menschen zugeordnet werden. Dabei wird eine Verbindung zum zentralen System etabliert. Nach der Analyse werden die Daten mit einer entsprechenden Reaktion resp. Anpassung wieder an das soziotechnische System zurückgeleitet. Ein Digitaler Zwilling besteht erst zu demjenigen Zeitpunkt, bei dem eine umfängliche Sicht auf ein System oder einen Menschen mit einer Datenaktualisierung in Echtzeit vorliegt. Die Erweiterung erfolgt somit durch die Zunahme des Umfangs der Datensätze sowie der Erhöhung der Datenübertragungsgeschwindigkeit.²⁵⁶

WERNER, et al. sowie die WISSENSCHAFTLICHE GESELLSCHAFT FÜR PRODUKTIONSTECHNIK WGP E. V. betrachten indes Digitale Abbilder vor dem Hintergrund der produzierenden Industrie. Ein Digitaler Schatten wird diesbezüglich als ein hinreichend genaues Abbild aller Produktions- und Entwicklungsprozesse sowie ihrer angrenzenden Bereiche beschrieben. Er kann ausschließlich durch gemessene Sensordaten erzeugt werden. Nur auf diese Weise kann eine Überführung des realen Produktionsprozesses in die virtuelle Welt erreicht werden und als Auswertungsbasis der jeweils relevanten Daten in Echtzeit dienen. Der Digitale Schatten beinhaltet alle Informationen über vergangene und aktuelle Zustände der zugehörigen Prozesse und ermöglicht somit eine Prognose zukünftiger Zustände. Werden die jeweils aktuellen Zustandsdaten für Simulationen oder anderweitige Analyseverfahren genutzt

²⁵⁴ Vgl. Boje, et al. 2020, S. 7.

²⁵⁵ Vgl. Engels 2020, S. 363.

²⁵⁶ Vgl. Engels 2020, S. 368.

und werden die Ergebnisse anschließend mit den Sensordaten verbunden, so lässt sich ein möglichst identisches Abbild der Realität als Digitaler Zwilling erzeugen.^{257, 258}

Nach KIRCHHOF, et al. werden die virtuellen Abbilder der Realität aus Cyber-Physischen Objekten oder Prozessen erzeugt, die fortschrittliches Controlling, Entscheidungsverhalten und Optimierung ermöglichen. Es existieren zahlreiche Einzelmodellen eines Systems, kontextbezogenen Datenpfaden und deren Aggregation sowie Abstraktion. Darüber hinaus bestehen mehrere Dienste, die eine gezielte Nutzung der Daten und Modelle im Hinblick auf das ursprüngliche System ermöglichen. Daraus ergibt sich, dass ein Digitaler Zwilling des Systems selbst kein Modell darstellt, sondern lediglich die Summe der Modelle innerhalb des Systems bildet, das es virtuell abbildet. Er kann aktiviert werden, indem die systemimmanenten Dienste, Datenbanken, Schnittstellen, Analysen oder gar Interaktionen aufgerufen werden. Darüber hinaus nutzt ein digitaler Zwilling seine Modelle und Verknüpfungen, um die Informationen zu bündeln, die von ihm selbst oder dem repräsentierten System stammen.²⁵⁹

Eine detailliertere Definition des Digitalen Zwillings wird von TAO, et al. gegeben und beinhaltet explizite Merkmale. Ein DT gilt hierbei als eine integrierte, physikbasierte, wahrscheinlichkeitsbedingte Simulation eines komplexen Produkts, das den jeweils aktuellen Status des physischen Abbildes widerspiegelt und daher auf den besten aktuell verfügbaren physikalischen Modellen und Sensor-Updates basieren muss. Dabei besteht der Digitale Zwilling aus drei Unterteilungen: dem physischen Objekt, dem virtuellen Objekt und deren Datenverbindung. Folgende Merkmale werden unter dieser Definition des Digitalen Zwillings zusammengefasst: *Ableich in Echtzeit*, *Interaktion und Konvergenz* sowie *Selbst-Evolution*. Das Merkmal *Interaktion und Konvergenz* wird wiederum in *Interaktion und Konvergenz im physischen Bereich*, *Interaktion und Konvergenz zwischen historischen und Echtzeitdaten* und *Interaktion und Konvergenz zwischen physischem und virtuellem Bereich* unterschieden.

Ableich in Echtzeit: Im digitalen Zwilling gibt es den physischen und den virtuellen Bereich. Der virtuelle ist das reale Abbild des physischen Bereichs. Informationen werden in sehr hoher Geschwindigkeit sowie Genauigkeit synchronisiert. **Interaktion und Konvergenz:** Dieses Merkmal lässt sich unter drei Aspekten erläutern: **Interaktion und Konvergenz im physischen Bereich:** Alle Prozess-, Element- und Service-Daten innerhalb unterschiedlicher Phasen des digitalen Zwillings sind miteinander verbunden. **Interaktion und Konvergenz zwischen historischen und Echtzeitdaten:** Die Daten des digitalen Zwillings sind vollumfassend. Er bezieht Informationen nicht nur aus dem Wissen von Expertinnen und Experten, sondern auch von allen eingesetzten Systemen in Echtzeit. Auf dieser gemeinsam genutzten Datengrundlagen wird eine umfangreiche Auswertung ermöglicht. **Interaktion und Konvergenz zwischen physischem und virtuellem Bereich:** Die beiden Bereiche sind nicht voneinander isoliert, sondern es gibt dedizierte Verbin-

²⁵⁷ Vgl. Werner, et al. 2020, S. 336.

²⁵⁸ Vgl. Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik WGP e. V. 2016, S. 23.

²⁵⁹ Vgl. Kirchof, et al. 2020, S. 90.

dungen, die eine umfassende Interaktion ermöglichen. Selbst-Evolution: Aus einem Echtzeitabgleich der Daten des virtuellen mit dem physischen Bereich des Digitalen Zwillings folgt eine kontinuierliche Verbesserung der virtuellen Modelle.²⁶⁰

Bei KRITZINGER, et al. spielt der Datenaustausch zwischen realem und virtuellem Gegenstück die übergeordnete Rolle. Ebenso in diesem Fall werden drei Abstufungen bei den Digitalen Abbildern auf Basis unterschiedlicher Informationsintegration unterscheiden: Digitales Modell, Digitaler Schatten und Digitaler Zwilling. Der Umfang und die Detaillierung der vorhandenen Daten oder Modelle sind hingegen nicht von Bedeutung, lediglich die Verbindung der einzelnen Instanzen wird betrachtet.²⁶¹

Das *Digitale Modell* stellt die geringste Form der Artefakte dar und damit das Digitale Abbild eines Planungsstands oder bereits existierenden physischen Bauwerks. Zu diesem besteht kein automatisierte Datenaustausch, wie in Abbildung 4-8 entsprechend der gestrichelten Linie erkennbar ist. Diese Art der Datenübertragung und somit jegliche Änderung wird manuell durchgeführt.

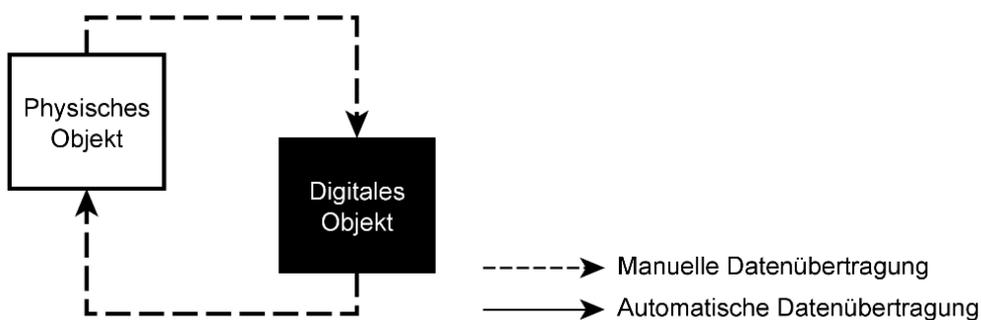


Abbildung 4-8: Datenaustausch innerhalb eines Digitalen Modells²⁶²

Ein Digitaler Schatten basiert auf dem Digitalen Modell und erweitert die Datenintegration in einer der beiden möglichen Richtungen. Informationen aus dem physischen Objekt werden sensorisch erfasst und automatisch in das virtuelle Objekt übertragen. Abbildung 4-9 verdeutlicht diese Abhängigkeit durch die durchgängige Linie als automatische Datenübertragung vom physischen zum digitalen Objekt.

²⁶⁰ Vgl. Tao, et al. 2018, S. 3566.

²⁶¹ Vgl. Kritzinger, et al. 2018, S. 1017.

²⁶² Nach Kritzinger, et al. 2018, S. 1017.

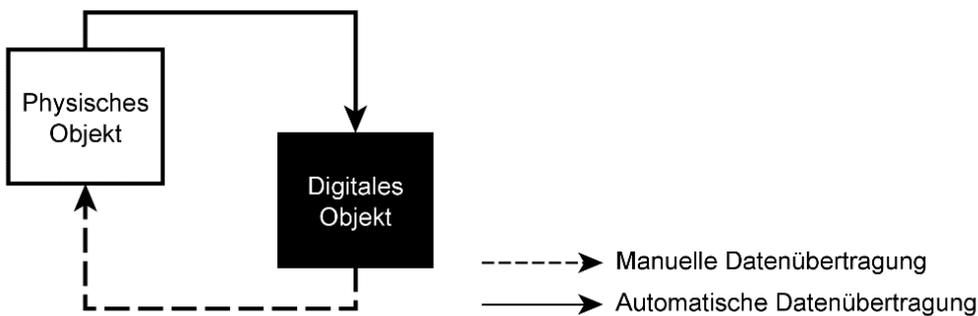


Abbildung 4-9: Datenaustausch innerhalb eines Digitalen Schattens²⁶³

Der Digitale Zwilling stellt die höchste Form der Artefakte dar und erweitert den Digitalen Schatten wiederum um eine automatisierte Datenintegration. Diese erfolgt nun bidirektional. Änderungen innerhalb des physischen Objektes werden sensorisch erfasst, automatisiert in das virtuelle Objekt übertragen und jede Änderung am virtuellen Aspekt führt automatisiert zur Zustandsänderung im physischen Objekt gemäß Abbildung 4-10.

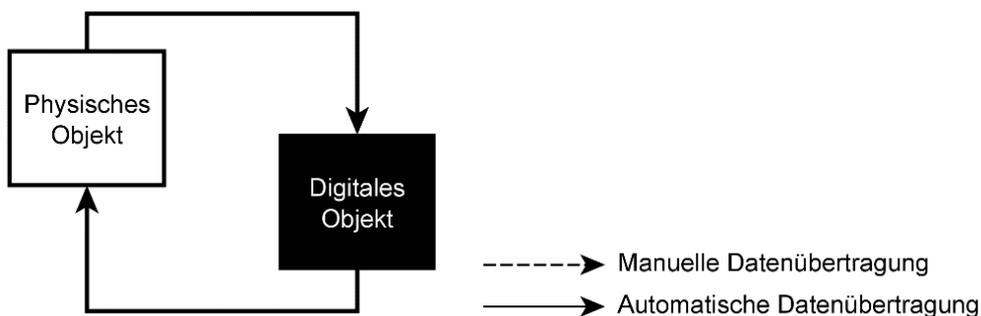


Abbildung 4-10: Datenänderung innerhalb eines Digitalen Zwillings²⁶⁴

Die zuletzt genannten Aspekte stellen bei BOJE, et al. den wesentlichen Untersuchungsgegenstand dar. Im dort beschriebenen Digitaler Zwilling-Paradigma stellen Digitale Zwillinge eine Symbiose aus physischem und virtuellem Modell dar, die untrennbar miteinander verbunden und auf die Daten des jeweils anderen angewiesen sind. Wie in Abbildung 4-11 dargestellt, besteht zwischen den virtuellen und physischen Komponenten des Systems eine Verbindung in Form einer Schleife. Darin werden Daten in unterschiedlichen Formen bereitgestellt. Die Daten vom Physischen zum Virtuellen sind unbehandelt und benötigen eine Behandlung resp. eine Aufbereitung. Hingegen werden die Daten in der entgegen gesetzten Richtung mehrfach prozessiert. Die so resultierenden Daten besitzen folglich bereits aufbereitetes Wissen innerhalb der

²⁶³ Nach Kritzinger, et al. 2018, S. 1017.

²⁶⁴ Nach Kritzinger, et al. 2018, S. 1017.

Digitale Modelle und werden letztlich wiederum über Aktoren in das physische Modell zurückgespielt. Der physische Teil sammelt somit Rohdaten aus der realen Welt, während der virtuelle Teil prozessiertes, technisches Wissen bspw. aus Methoden der Künstlichen Intelligenz oder Data Analytics verwendet, um Informationen zu generieren, die für die Überwachung sowie die Steuerung des physischen Modells verwendet werden können.²⁶⁵

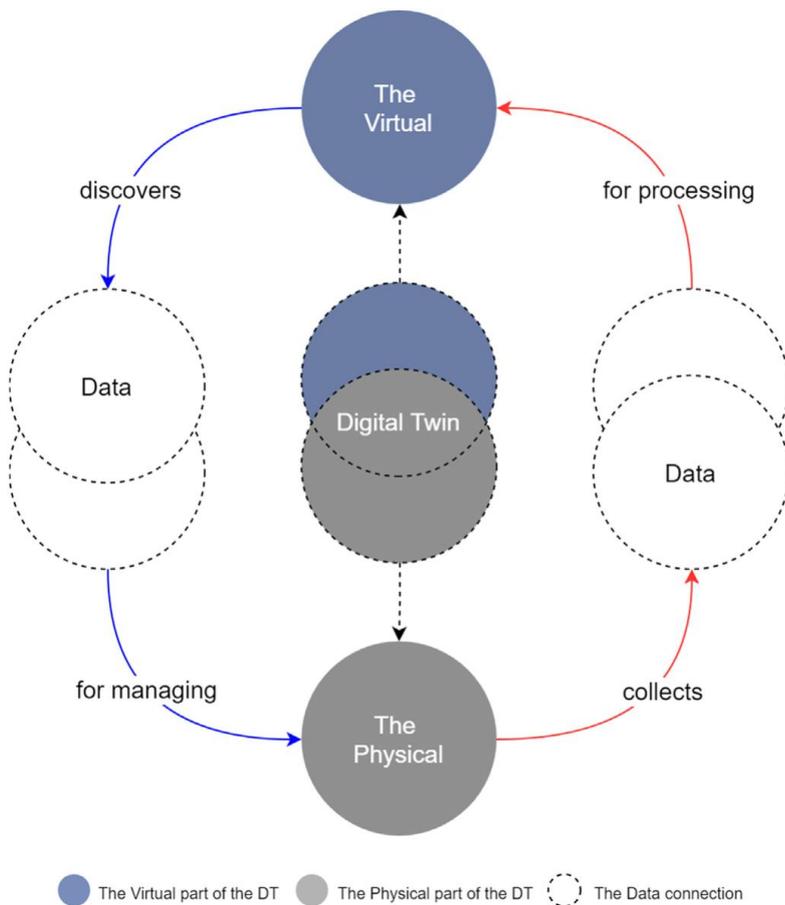


Abbildung 4-11: Das Digitaler Zwilling-Paradigma²⁶⁶

Entgegen den eben genannten, teils sehr detailliert beschriebenen Definitionen, verwenden laut SACKS, et al. viele Autorinnen und Autoren im akademischen Umfeld sowie in der Bauindustrie den Begriff Digitaler Zwilling lediglich als Synonym für BIM-Modelle, die für Planung und Ausführung der jeweiligen Projekte erstellt wurden.²⁶⁷ Die Modelle beinhalten diesbezüglich Informationen aus Planungs-, Bau- und Betriebsphase und werden je nach Stand als *as-planned-Modell* oder *as-built-Modell* bezeichnet.²⁶⁸ Jedoch ist hierbei davon auszugehen, dass die erstellten

²⁶⁵ Vgl. Boje, et al. 2020, S. 3.

²⁶⁶ Boje, et al. 2020, S. 3.

²⁶⁷ Vgl. Sacks, et al. 2020a, S. e14-2.

²⁶⁸ Vgl. Gralla & Lenz 2019, S. 689.

Modelle in sich geschlossen bleiben und nach Abschluss des Bauprojektes keinen weiteren Nutzen haben. Dabei wird die Verwendung für zukünftige Lebenszyklen vernachlässigt.²⁶⁹

Die jeweiligen Definitionen in ihren unterschiedlichen Detaillierungsgraden folgen einem gemeinsamen Ziel: Anhand virtueller Abbilder von realen Bauwerken sollen zukünftig unterschiedliche Anforderungen umgesetzt werden können. In der aktuellen Forschung entstehen für die Umsetzung solcher Anforderungen bereits neue Methoden sowie Prozesse, die die Verwendung Digitaler Abbilder beschreibt und sich mit grundlegenden Verwendungsbedingungen auseinandersetzt. Speziell für die Verwendung Digitaler Abbilder in der Ausführung von Bauprojekten wird eine Methodik genannt, die nachfolgend näher betrachtet werden soll, die Methodik *Digital Twin Construction*.

²⁶⁹ Vgl. Boje, et al. 2020, S. 2.

4.4. Digital Twin Construction

Als *Digital Twin Construction* (DTC) wird nach SACKS, et al. eine datenzentrierte Methodik für das Management von Bauprojekten bezeichnet, bei der Informations- und Vermessungstechnologien in einem geschlossenen Planungs- und Kontrollsystem eingesetzt werden.²⁷⁰ Dabei stellt DTC in dieser Beschreibung keine logische Weiterentwicklung der Methode BIM oder eine Erweiterung von BIM-Applikationen mit integrierten Vermessungstechnologien dar. Vielmehr gilt es als Methode zur Abwicklung von Bauprojekten, bei der die Datenerhebung und -verwendung innerhalb geschlossener Steuer- oder Regelkreise erfolgt und somit Managemententscheidungen auf zuverlässigen und zeitnahen, gar quasikontinuierlichen Informationen beruhen. Die immanente Datenzentriertheit ist gegenüber der aktuell verwendeten Projektmanagementform der wichtigste Unterschied von DTC. Das bedeutet, die Daten stellen den zentralen Aspekt der Informationsübertragung und nicht nur ein Hilfsmittel für die Produktion dar. Resultierend sind Planungs- und Kontrollfunktionen fest in der Kernfunktionalität von DTC verankert, während in BIM-Normen lediglich der Informationsfluss definiert wird. Dieser Informationsfluss basiert auf Dateiformaten, die zwar objektorientiert sind, eine Beziehung der Daten über einzelne Dateien hinaus indes nicht gegeben ist. Mit einer grundlegend vorhandenen Relation der Daten zueinander und deren automatisierten Verarbeitung, könnten Systeme oder Methoden der Künstlichen Intelligenz diese Daten zur Interpretation, Analyse, Simulation und Vorhersage herangezogen werden. Voraussetzung können jedoch objektorientierte Grafendatenbanken mit dem Datenarchiv in der Cloud darstellen. Ist dies gegeben, könnte der manuelle Aufwand, der aktuell von Menschen durchgeführt wird, z.B. das Messen oder das Prüfen, erheblich reduziert werden.²⁷¹

Derzeitige Workflows des Bauprojektmanagements, einschließlich derjenigen, die modellbasiert arbeiten, unterscheiden sich laut SACKS, et al. in zwei wesentlichen Punkten von der Digital Twin Construction. Erstens werden die Informationen und Daten von Projektbeteiligten abgegrenzt generiert und mit eindeutigen Urheber- und Schreiberrechten versehen, sodass ein Austausch nur bei Bedarf oder in regelmäßigen Abständen erfolgt. Zweitens werden die Informationen über den aktuellen Stand der Bauarbeiten nahezu ausschließlich manuell erfasst. Analysealgorithmen, die auf maschinenlesbare Informationen angewiesen sind, können dabei kaum verwendet werden.²⁷²

Die DIN EN ISO 19650 stellt explizite Anforderungen für den Datenaustausch unterschiedlicher Projektbeteiligter dar und regelt, bei welchem Bedarf eine gewisse Qualitätsprüfung erfolgen muss. Dabei wird explizit davon ausgegangen, dass unterschiedliche Systeme für die Verwendung der Daten genutzt werden. Die aktuelle DIN EN ISO 19650 beschreibt die Datenübertragung mittels *Informationscontainer*²⁷³ und grenzt somit die Inhalte gegeneinander ab. Digital Twin Construction stellt sich hingegen ganzheitlicher dar, da die Daten auf den vorab bereits

²⁷⁰ Vgl. Sacks, et al. 2020a, S. 22.

²⁷¹ Vgl. Sacks, et al. 2020a, S. 18.

²⁷² Vgl. Sacks, et al. 2020a, S. 19.

²⁷³ Vgl. DIN EN ISO 19650-1 2019-08, S. 15.

angesprochenen objektorientierten Grafendatenbanken in der Cloud prozessiert werden. Es gilt zu beachten, dass sich DTC einzig auf die Planungs- und Bauphase beschränkt. Informationen, die für nachgelagerte Anwendungen wie die Verwendung eines Digitalen Zwillings in der Betriebsphase benötigt werden, müssen eigens extrahiert werden. Diese Informationen basieren jedoch auf den auf den Baustellen generierten Daten und beinhalten wenig bis keine Informationen aus der Planungsphase.²⁷⁴

Die Interaktion von und mit virtuellen Modellen ist ein bemerkenswerter Aspekt. So beschreiben SACKS, et al. eine Vielzahl von Digitalen Zwillingen, die entsprechend miteinander interagieren. Hierbei können bspw. die Digitalen Zwillinge von Baugeräten, Turmdrehkran und zu erstellendem Bauwerk miteinander kommunizieren, um die optimale Betoneinbringungen zu errechnen, nachdem aktualisierte Informationen aus den Verkehrsnetzen herangezogen wurden und somit eine Aktualisierung des Zeitpunkts der Betonlieferung erfolgt ist. Bezeichnet wird dies als *System der Systeme* und beschreibt, dass Digitale Zwillinge in einem Netzwerk anderer Digitaler Zwillinge voll funktionsfähig sind.²⁷⁵

Solche Interaktionen sind von entscheidender Bedeutung, da DTC in einem Kontext unterschiedlicher Systeme und Bauprojekte eingesetzt werden muss. Dazu gehören unter anderem lokale oder globale Systeme von Auftraggeber, Lieferanten, aber auch Baumaschinen oder einzelne Sensoren, die gegebenenfalls jeweils durch eigene digitale Repräsentanten dargestellt sind. Ferner werden die Interaktionen der Systeme, Kommunikationsprotokolle sowie Daten- und Transferqualität untersucht und präzisiert werden müssen. Ziel und Zweck der Systematik ist die Notwendigkeit der Erweiterung der Digitalen Zwillinge aus Daten der physischen Realität.²⁷⁶

In Abbildung 4-12 beschreiben SACKS, et al. wie Datenmodelle, Prozesse und Leistungserfassungssysteme, die im Prozess der Digital Twin Construction genutzt werden bzw. dort ablaufen um die Daten aus der Realität erweitert werden können. Zu Beginn steht das *Design knowledge*, bei dem Planende resp. Designende entsprechend dem Projektauftrag ihre Ideen und die funktionalen Anforderungen des Auftraggebers in einem Entwurf umsetzen. In diese Designphase werden Informationen aus dem Archiv, spezifischer aus Bereichen sog. Historical Digital Building Twins als historische Daten einbezogen. Dies wird im Verlauf der Arbeit vertieft erläutert.

Nach einer Bestätigung der Entwürfe wird das Bauwerk und der Erstellungsprozess im Prozess *Design product, Plan process* geplant. Daraus wird das Datenmodell *Project Intent Information* (PII) generiert. Es beinhaltet den aktuellen Entwurf des Bauwerks bzw. den geplanten Bauprozess. Diese Daten werden in Form des Prozesses *Predict performance* genutzt, um unterschiedliche Varianten und Möglichkeiten des Bauwerks oder der Bauverfahren zu simulieren und zu analysieren. Dabei kann und sollte auf Daten aus früheren Projekten zugegriffen und deren Erfahrung in die Planung bzw. das Design einbezogen werden. Diese Daten sind in den *Histori-*

²⁷⁴ Vgl. Sacks, et al. 2020a, S. 19.

²⁷⁵ Vgl. Sacks, et al. 2020a, S. 20.

²⁷⁶ Vgl. Sacks, et al. 2020a, S. 22.

cal Digital Building Twins gespeichert. Deren Inhalte werden später erläutert. Durch die Ergebnisse der verschiedenen Simulations- und Analyseverfahren wird Wissen in Form des *Project Intent Knowledge* (PIK) aufgebaut. Darin enthalten sind unter anderem geplante Leistungswerte für verschiedene Bauverfahren oder statisches Verhalten des Bauwerks. Darüber hinaus enthält dieses Datenmodell aktuelle Informationen des Zustands des physischen Bauwerks aus dem *Project Status Knowledge* (PSK). Aus jedem Prozess wird ein Feedback generiert und in den Design-Prozess überführt, sodass ein iterativer Planungsprozess mit neu generiertem Wissen entstehen kann.²⁷⁷

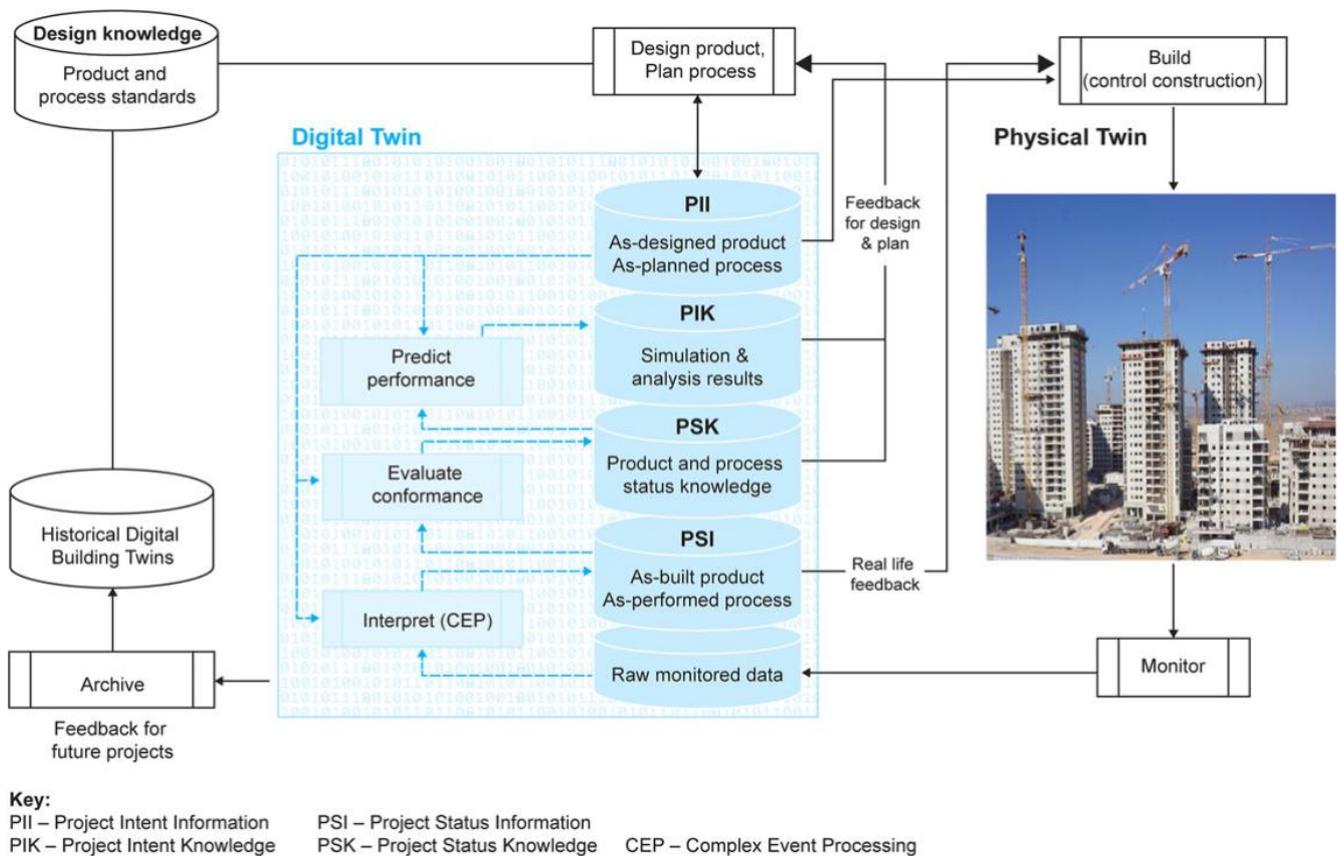


Abbildung 4-12: DTC workflow process²⁷⁸

Der Bauprozess des physischen Zwillings, dargestellt durch den Prozess *Build (control construction)*, wird vorwiegend durch die Informationen des PII umgesetzt. Während der Bauphase überwachen Monitoringsysteme den Bau und generieren dadurch Rohdaten des Bauwerks (*Raw monitored data*). Darin enthalten ist ebenso der aktuelle Status der vorgefertigten Elemente, deren Bestellprozess auf den Informationen des PII basiert. Die Interpretation aller Rohdaten

²⁷⁷ Vgl. Sacks, et al. 2020a, S. 16.

²⁷⁸ Sacks, et al. 2020a, S. 15.

erfolgt in Form eines *Complex Event Processing* (CEP) und bezieht ebenfalls aktuelle Informationen aus den überarbeiteten Design-Informationen aus dem PII. Die interpretierten Daten aus den CEP generieren das Datenmodell mit den *Project Status Information* (PSI). Dort sind folglich diejenigen Informationen enthalten, die darstellen, was aktuell gebaut wurde (As-built product) und ebenso wie die Performance der angewendeten Bauverfahren ausgefallen ist (As-performed process). Die dadurch erhaltenen Informationen werden wiederum als *Real life feedback* in den Bauwerkserstellungsprozess überführt, um die eigene Performance zu verbessern. Darüber hinaus werden die Informationen aus dem PSI einer Konformitätsprüfung (*Evaluate conformance*) unterzogen, um zu gewährleisten, dass einerseits der Zustand des Bauwerks den Anforderungen aus dem geplanten Bauwerk entspricht sowie dass die Performance der Bauverfahren den geplanten Prozessen entspricht resp. in der hinreichenden Toleranz liegen und keine schwerwiegenden Abweichungen aufgetreten sind. Die hieraus entstehenden Ergebnisse spiegeln das gebündelte Projektwissen in Form des *Project Status Knowledge* in Form von Wissen über den Zustand des Bauwerks sowie die Leistungsfähigkeit der Bauverfahren wider. Dieses Wissen wird wiederum in den Design-Prozess überführt, um eine kontinuierliche Verbesserung der Prozesse oder des Bauwerks vornehmen zu können. Es wird somit ein Plan-Do-Check-Act-Zyklus²⁷⁹ vorgenommen, sodass Planende und Designende eine Rückmeldung über den aktuellen Status erhalten. Andererseits werden die Informationen des PSK in den Prozess des *Predict performance* überführt, sodass mögliche Abweichungen vom geplanten Bauwerkszustand, Bauprozess oder Bauzeitenplan vorhersagen zu können. All diese Informationen gehen anschließend in das Datenmodell PII für die Steuerung des Bauprozesses über.

Nach Abschluss des Bauprozesses werden die erfassten Informationen archiviert, um einem nächsten Projekt als historische Daten zu Verfügung zu stehen. Je mehr Daten aus der Bauausführung in derselben Datenform im Archiv vorhanden sind, um so präziser sind Algorithmen in Form von Methoden der Künstlichen Intelligenz in der Lage ein mögliches Verhalten von Bauverfahren vorherzuberechnen resp. Schlüsse für Ist-Abweichungen des Bauwerks vom Soll zu ziehen.²⁸⁰

In konventionellen Projektverläufen wird am Ende eines Projekts der jeweils aktuelle Stand des Bauwerks an die Bauherrschaft übergeben. Dort werden allerdings keine Informationen über die anfangs geplanten Zustände des Bauwerks sowie mögliche Verfahren oder Gründe für Änderungen einbezogen. Die Möglichkeit eines Lernprozesses aus den im Projekt aufgetretenen Änderungen ist somit gering, da die entsprechenden Informationen nicht in die zukünftige Projektplanung einbezogen werden können. Im Fall des DTC ist hingegen beabsichtigt, alle Informationen aus Planung, Änderung, etc. in die Archivierung als *Feedback for future projects* gemäß Abbildung 4-12 zu übernehmen.²⁸¹

²⁷⁹ Der Plan-Do-Check-Act-Zyklus ist ein Bestandteil der Lean Construction-Philosophie und beschreibt einen Selbstverbesserungsprozess

²⁸⁰ Vgl. Sacks, et al. 2020a, S. 17.

²⁸¹ ebenda

Entgegen der Darstellung von SACKS, et al., bezeichnen BOJE, et al. das Konzept Construction Digital Twin (CDT) durchaus als eine Evolution der Methode BIM. Sie sehen primär den Digitalen Zwilling als Kernelement, entgegen der Darstellung bei DTC, wo die Prozesse die Kernelemente bilden.

Die Evolution der Methode BIM erfolgt bei CDT auf Basis dreier Generationsstufen linear, jedoch kontinuierlich über den Lebenszyklus des Bauwerks, wie in Abbildung 4-13 dargestellt. Wichtige Bestandteile bilden die kontinuierlich zu verbessernde Einbindung der Lieferkettendaten (Supply Chain Integration) sowie die notwendige Weiterentwicklung der verwendeten Technologien. Eine Zusammenführung der virtuellen Modelle mit den sensorischen Daten sollte auf einer gemeinsamen *Semantic-Web-Plattform* erfolgen.

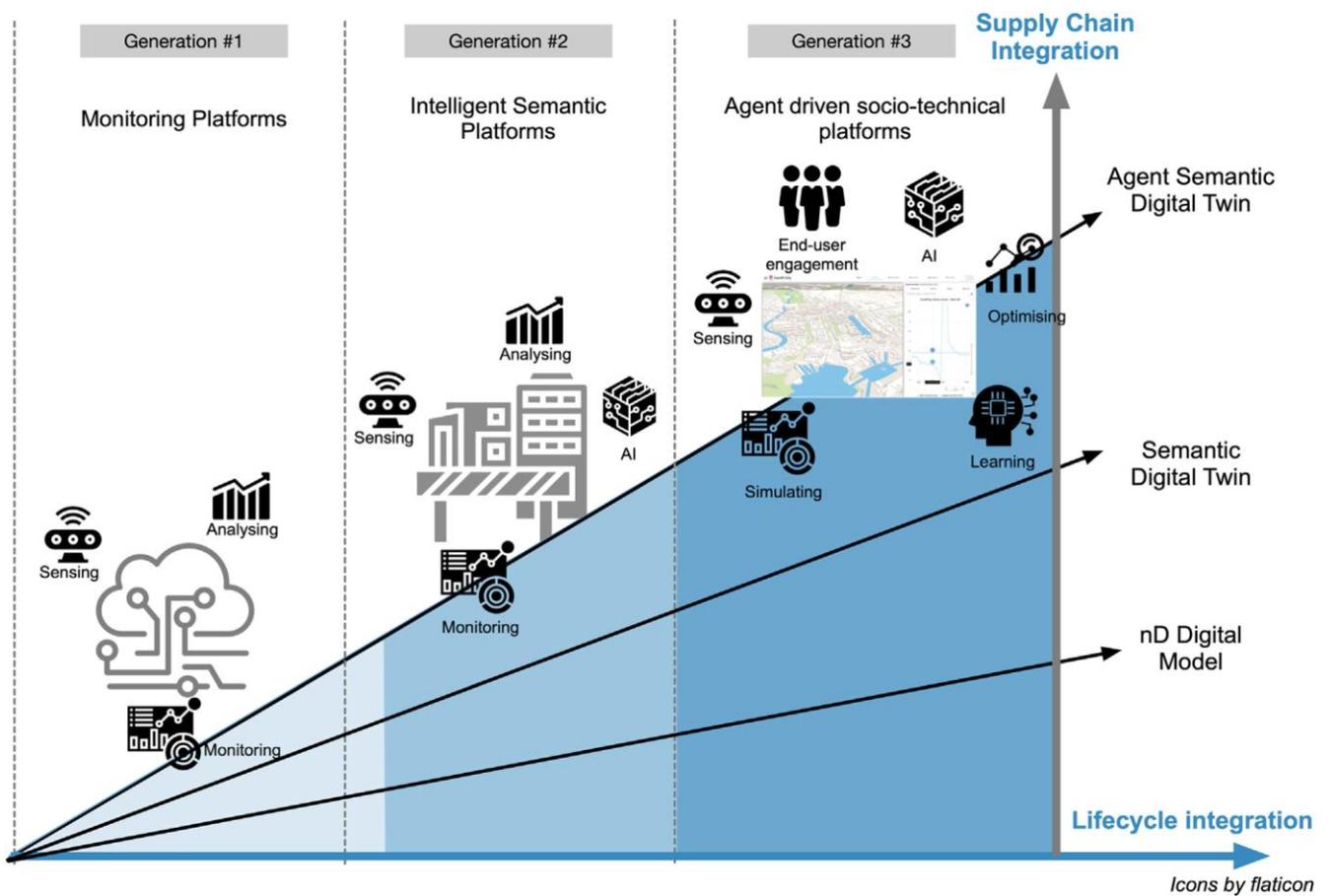


Abbildung 4-13: Die dreistufige Evolution des Construction Digital Twin²⁸²

²⁸² Boje, et al. 2020, S. 13.

Die einzelnen Generationen gliedern sich wie folgt:

Generation 1 – monitoring platforms:

Der erste Schritt ist die Erfassung der physischen Welt mit einem geringfügigen Umfang an Funktionalitäten bei Berichten und Analysen. Es besteht die Möglichkeit der Einbindung älterer Digitaler Modelle. Diesbezüglich stellen 3D-Modelle den geringsten Informationsumfang dar, je nach zusätzlichen Informationen werde diese zu 4D, 5D bis hin zu nD-Modellen²⁸³ aggregiert. Von einer Erläuterung der einzelnen Dimensionen wird an dieser Stelle abgesehen, da deren Interpretation für das Verständnis nur eine untergeordnete Rolle spielt.

Die nD-Modelle werden mit den Daten aus Sensoren verknüpft. Dies stellt wiederum den ersten Schritt in Richtung der Integration von Standort-Sensorik und Digitalen Modellen in Echtzeit dar und ist die Erweiterung der bisherigen Nutzung von BIM-Modellen auf Baustellen. BIM-Modelle können nicht alle Informationen ohne weiteres liefern, die für nachfolgende Lebenszyklusphasen erforderlich sind. Darüber hinaus sind sie nicht dahingehend erweiterbar, dass komplexere Berechnungen wie Vorhersagen oder Verbesserungen erfolgen können.

Generation 2 – intelligent semantic platforms:

Diese Generation stellt eine erweiterte Überwachungsplattform mit begrenzter Intelligenz resp. Automatisierung dar. Diesbezüglich wird der Digitale Zwilling mit allen verknüpften IoT-Geräten auf einer zentralen webbasierten Plattform ausgeführt. Das System bildet folglich eine Wissensplattform mit begrenzter Intelligenz, die sich auf statische Wissensregeln und separate, KI-Algorithmen stützt, um Simulationen resp. Vorhersagen zu prozessieren. Diese Generation erfordert signifikante menschliche Interaktionen, um die Optimierung und den Betrieb des Digitalen Zwillings zu ermöglichen. Eine direkte Wechselwirkung mit der unmittelbaren Umgebung umfasst einen größeren Kontext des Baustellenmanagements und versetzt den DT in ein komplexes soziotechnisches Dilemma, in dem er in Echtzeit auf die Benutzenden und tägliche Veränderungen des Projektes dynamisch reagieren muss.

Generation 3 – agent driven socio-technical platforms:

In der höchsten Generation wird ein vollständig semantischer DT gebildet, der eigenständig Wissen durch KI-gestützte Agentensysteme und andere Analysefunktionen prozessieren kann. Neben den semantischen müssen dabei auch soziale Aspekte der Projekte einbezogen werden. Für die Unterstützung ganzheitlicher Entscheidungen, muss der Digitale Zwilling vollständig mit den Anwenderinnen und Anwendern in Verbindung treten und sich somit den sozialen Anforderungen anpassen können. Die Steuerung der Umgebung muss durch das DT-System vollständig autonom erfolgen und erfordert menschliche Aufsicht.

²⁸³ n steht in diesem Fall für eine natürlich Zahl im Sinne der mathematischen Definition, jedoch größer als 5. Dies ist der Fall, da bis zu dieser Zahl die Dimensionen definiert sind: 3D beschreibt die geometrische, 4D die zeitliche und 5D die kostenbezogene Ausprägung

4.5. Forschungslücke

Im Zuge der empirischen Untersuchungen und infolgedessen als Resultat der ersten Forschungsfrage haben sich Problemstellungen in der Kommunikation innerhalb einer Bauprojektorganisation in Form von Generierung und Weiterleitung von Informationen herauskristallisiert. Bei vorhandenen Prozessen gilt es durch eine Verminderung der manuellen Eingabe resp. der Einbindung von Daten in EDV-Systeme einen höheren Automatisierungsgrad zu erreichen. Dies soll zu einer durchgängigen Vernetzung der Prozesse führen und zu einer Beschleunigung sowie Verbesserung der Entscheidungsmöglichkeiten vor allem im Prozess des Bauprojekt-Controllings beitragen. Allen voran ist eine *Single Source of Information* als Grundlage zu etablieren.

Bei Betrachtung des aktuellen Stands der Forschung hinsichtlich Digitaler Abbilder sowie der Automatisierung von Prozessen im Bauwesen werden einige Aspekte deutlich. Im Bereich der Planung wird die Aufbereitung resp. die Aggregation von BIM-Modellen mit einer Vielzahl an semantischen Informationen von einem 3D-Modell hin zu einem 4D-, 5D- oder gar nD-Modell beschrieben. Ferner werden zahlreiche Theorien über die Einbindung von Digitalen Modellen, Digitalen Schatten, Digitalen Zwillingen oder zugehörigen Methoden wie der *Digital Twin Construction* gebildet, es erfolgt jedoch keine praktische Umsetzung. Im Zuge der Ausführung beschäftigt sich eine Vielzahl wissenschaftlicher Untersuchungen mit der Verwendung sensorischer Aufnahmen als Quelle von Echtzeitdaten auf den Baustellen. Dabei werden einerseits die Arten und Einbindung der Sensornetzwerke, die Herausforderungen bei der Verwendung sowie mögliche Anwendungsszenarien beschrieben. Andererseits werden Vorgehensweisen, teils sogar Algorithmen beschrieben, die eine automatisierte Erkennung resp. Klassifizierung von Bauteilen ermöglichen. Eine ganzheitlich durchgehende Verwendung von Modelldaten im Zuge eines Bauprojektes bei der Überführung der Daten in Digitale Modelle der Planungsphase und ein anschließender Abgleich der Daten zwischen virtuellen und physischen Modellen innerhalb der Ausführungsphase entfällt. Darüber hinaus wird deutlich, ein Großteil der innerhalb der Ausführungsphase verwendeten Steuerungsprozesse wird manuell durchgeführt, resultierende Entscheidungen erfolgen zeitverzögert und sind ggf. bereits überholt. Die verwendeten Daten sind teils geringfügig aufbereitet und teils inkonsistent.

Es ergibt sich infolgedessen die nachstehende Forschungslücke: Es fehlt an einer durchgängigen Regelungsmöglichkeit innerhalb der Prozesse des Bauprojekt-Controllings auf Basis Digitaler Abbilder mit einer in der Praxis erprobten Umsetzung als Realisierbarkeitstest. Hauptaugenmerk liegt diesbezüglich auf der Umsetzung der zugehörigen Prozesse als Regelkreis im Sinne einer Echtzeitsteuerung innerhalb des Prozesses des Bauprojekt-Controllings. Um den Rahmen des Forschungsprojektes nicht zu überschreiten, wird in der praktischen Umsetzung eine Eingrenzung der entsprechenden Prozesse vorgenommen. Die Modellbildung erfolgt hingegen ganzheitlich innerhalb der Sphäre eines ausführenden Bauunternehmens.

5. Integration Digitaler Abbilder in das Bauprojekt-Controlling

Im vorherigen Kapitel wurde der theoretische Bezugsrahmen für die technische und sozio-technische Thematik des systemischen und kybernetischen Denkens in zirkulärer Darstellung vor dem Hintergrund von Digitalen Abbildern erläutert. Im folgenden Kapitel werden daher die in der Theorie dargestellten Prozesse, Methoden und Verfahren auf eine praktische Ebene projiziert. Diesbezüglich erfolgt zuerst eine Ausrichtung der zugehörigen Methodik und eine Einbindung der zugehörigen Bausteine der Industrie 4.0 in den Kontext des Bauwesens. Anschließend erfolgt in Kapitel 5.2 die der Arbeit zugrunde liegende Definition des Paradigmas Digitaler Abbilder, der zugehörigen Einbeziehung von Cloud-Systemen sowie der Darstellung des Vorgehens bei der Einführung der Methode der Digital Twin Construction in einem Unternehmen. Es wird ein dreistufiges Vorgehen vorgeschlagen, das sich mit unterschiedlichen Arten Digitaler Abbilder und infolgedessen ebenso mit unterschiedlichen Stufen der Datenintegration auseinandersetzt. Die unterschiedlichen Stufen der Datenintegration beinhalten wiederum verschiedene Ausprägungen sowohl an Semantik als auch an Rahmenbedingungen für eine zugehörige IT-Infrastruktur. In Kapitel 5.4 wird die Methode der Digital Twin Construction auf die Prozesse des Bauprojekt-Controllings übertragen und erläutert. Dabei wird dediziert auf die Prozessschritte und die zugehörige Änderung innerhalb der Prozessgeschwindigkeit eingegangen. Abgeschlossen wird das Kapitel mit der Entwicklung einer Prozessübersicht mit Steuer- und Regelkreismechanismen, die eine Beschleunigung bei Entscheidungsprozessen innerhalb des Bauprojekt-Controllings ermöglichen.

5.1. Methodenausrichtung

Die Datendurchgängigkeit ist einer der Kernaspekte der Industrie 4.0. Im Grunde erfolgt jegliche Kommunikation über vernetzte, verteilte Systeme. Äquivalent erschließt sich im Bereich von Bauen 4.0 die Datendurchgängigkeit als zentraler zu beachtender Aspekt und wird in der vorliegenden Arbeit als Grundlage der verwendeten Methode herangezogen.

Die in Abbildung 5-1 dargestellten Bausteine der Industrie 4.0 vor dem Hintergrund des Bauwesens stellen grundlegende technologische Aspekte dar, unter deren physischen sowie digitalen Teilen idealerweise eine solche kontinuierliche, automatische Datenverbindung bestehen kann, die den Ansprüchen einer Datendurchgängigkeit genügt. Abstufungen dieser Datenverbindung bis hin zu einer manuellen Übertragung und einer daraus resultierenden Abwertung des jeweils verwendeten Digitalen Abbildes werden in Kapitel 5.2 erörtert.

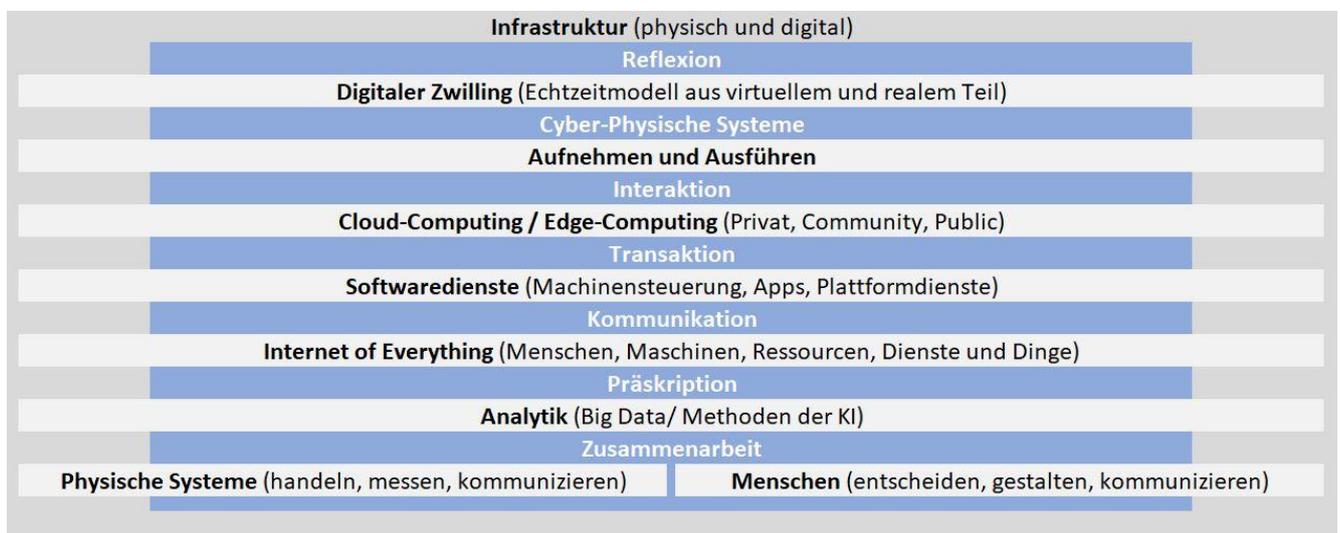


Abbildung 5-1: Bausteine der Industrie 4.0 vor dem Hintergrund des Bauwesens²⁸⁴

In einem idealen Fall einer kontinuierlichen automatischen Verbindung innerhalb der physischen und digitalen Infrastruktur eines Bauprojektes bildet der der Digitale Zwilling als Echtzeitmodell gemäß Abbildung 5-1 eine reflexierende²⁸⁵ Basis, welche den virtuellen sowie den realen Teil des betrachteten Bauwerks abbildet. Die Erfassung der zugehörigen Daten und die Ausführung der notwendigen Aktionen am realen Bauwerk erfolgen durch Cyper-Physische Systeme. Diesbezüglich erfolgt die Interaktion zwischen der Datenbasis und den Endgeräten mittels Technologie des Cloud- oder des Edge-Computing. Infolgedessen wird eine möglichst geringe, jedoch notwendig große Informationsübertragung erreicht. Die entsprechende Transaktion der Daten zwischen den Speicherorten wird über Softwaredienste gesteuert, die somit die Kommunikation unter dem Überbegriff des Internet of Everything sicherstellen. Analytische Aspekte am

²⁸⁴ In Anlehnung an Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik WGP e. V. 2016, S. 6.

²⁸⁵ Reflexion: Ausgewählte Daten des Datenmodells können während der Laufzeit manipuliert werden

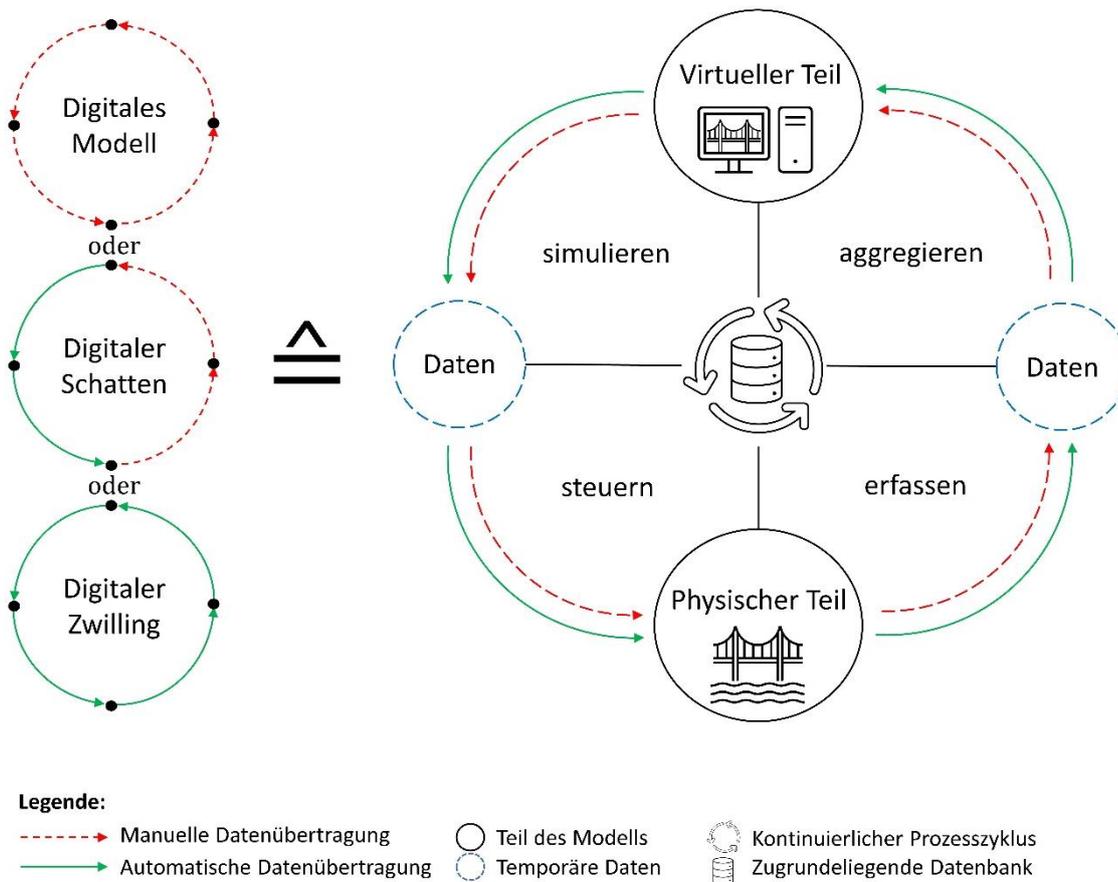
virtuellen Teil des Bauwerks erfolgen präskriptiv durch Berechnungen mit Methoden der Big Data oder des maschinellen Lernens. Somit resultiert eine Zusammenarbeit aus den physischen Systemen als messende und handelnde sowie den Menschen als gestaltende und entscheidende Instanzen

5.2. Digitale Abbilder innerhalb der Digital Twin Construction

Um der Datendurchgängigkeit als Kernelement der Industrie 4.0 Rechnung zu tragen, werden Systeme für die weitere Verwendung benötigt, bei denen sowohl manuelle, vor allem aber automatische Datenübertragungen von und zu einer zentralen, kontinuierlich verfügbaren Datenquelle führen. Dieser Aspekt wird durch die Methode *Digital Twin Construction* in Anlehnung an SACKS, et al. erreicht und daher dieser Arbeit zugrunde gelegt. DTC wird diesbezüglich als eine Evolution der Methode BIM angesehen, da BIM-Modelle weiterhin als Teil der Methode DTC erhalten bleiben. Sie bilden jedoch eine Sonderform der innerhalb der Methode verwendeten Modelle. Die Gesamtheit aller Modelle wird in Anlehnung an BOJE, et al. unter dem Paradigma *Digitale Abbilder* zusammengefasst. Die Verwendung des Begriffs Paradigma bedeutet in diesem Fall ein Umdenken in der Verwendung von Modelldaten. Es wird somit nicht länger möglich sein, virtuelle Modelle getrennt von ihren physischen Gegenständen zu betrachten, sondern sie sind einzig als Verbund zu sehen. BIM-Modelle bilden dabei aus demjenigen Grund die Sonderform der Digitalen Modelle in der Methode DTC, da bei ihnen keine Verbindung zwischen virtuellem und physischem Teil des Modells zu bestehen hat. Dies liegt meist am Umstand der Modellerstellung im Planungs- resp. Designprozess in einer sehr frühen Projektphase, in der noch keine Ablage auf einer zentralen Datenplattform als sinnvoll erachtet wird und somit kein physischer Teil des Bauwerksbereich einbezogen werden kann.

5.2.1. Das Paradigma Digitale Abbilder

Im Paradigma Digitale Abbilder werden gemäß Abbildung 5-2 im Sinne der vorliegenden Arbeit allgemein drei Arten von Modellen definiert: das Digitale Modell, der Digitale Schatten und der Digitale Zwilling. In diesen Fällen besteht jede Art der Modelle aus einem virtuellem und einem physischen Teil. Der virtuelle Teil wird als eine Summe von Daten und als ein hinreichend genaues virtuelles Abbild des physischen Teils gebildet. Zwischen den jeweiligen Teilen der drei Arten der Modelle bestehen Verbindungen unterschiedlicher Ausprägung. Definiert sind die manuelle und die automatische Übertragungsart. Entlang dieser Verbindungen werden temporäre Daten übertragen, die den Zustand des jeweiligen Teils des Bauwerks vorgeben resp. manipulieren. Auf diese Weise bilden die Ergebnisse der Simulationen aus dem virtuellen Teil des Bauwerks die Grundlage für die Steuerung des physischen Teils. Eine Erläuterung dieser Steuerung erfolgt im späteren Verlaufe der Ausarbeitung. Ferner bilden die Daten aus der Erfassung des physischen Teils des Bauwerks die Grundlage für die Datenänderung im virtuellen Teil, die sog. Datenaggregation. Alles verläuft in einer zyklischen Form und auf Basis einer zentralen Datenhaltung.

Abbildung 5-2: Das Paradigma *Digitale Abbilder*²⁸⁶

Die Ausprägung der Datenübertragung ist maßgebend für die Definition der Digitalen Abbilder. Das Digitale Modell bildet diesbezüglich mit ausschließlich manuellen Datenübertragungen die am wenigsten vernetzte Form und kann bereits einen Planungsstand eines Projektes oder ein bereits existierendes physisches Bauwerk virtuell abbilden. Das BIM-Modell fällt ebenfalls in diese Kategorie, jedoch als Sonderform ohne einen physischen Teil des Bauwerks. In vielen Bereichen der Bauindustrie wird man weiterhin BIM-Modelle resp. solche Bauwerke haben, bei denen einzelne Bereiche des physischen Teils ohne CPS in Form von Sensoren oder Aktoren verwendet werden. Beispielsweise wird ein Stahlbeton- oder ein Stahlkörper eines Brückenüberbaus nur in speziellen Fällen mittels CPS gesteuert werden können. Hingegen wird sein virtuelles Abbild als Datenbank für Herstellungsinformationen aus der Bauausführung dienen.

Der Digitale Schatten ist die Erweiterung des Digitalen Modells. Eine der Verbindungen zwischen physischem und virtuellem Objekt ist zwingend automatisiert auszuführen. In Abbildung 5-2 wird zwar diejenige Verbindung vom virtuellen zum physischen Teil des Modells als automatisch dargestellt und die Verbindung vom physischen zum virtuellen Teil als manuell. Jedoch lässt sich die Form der Datenübertragung auch in umgekehrter Reihenfolge abbilden, sodass

²⁸⁶ Eigene Darstellung

vom physischen zum virtuellen Teil eine automatische und vom virtuellem zum physischen Teil eine manuelle Verbindung besteht. Als ein Beispiel für einen Digitalen Schatten können Sensoren an Stützen oder Lagern bei Brückenbauwerken dazu dienen, die Bewegung des Bauwerks zu überwachen und innerhalb des DS zu speichern. Die Bau- oder Projektleitung wird auf diese Weise über kritische Bewegungen informiert und kann ggf. entsprechende Maßnahmen einleiten. Im Verlaufe der Arbeit werden weitere Beispiele aufgeführt.

Der Digitale Zwilling stellt abschließend die ideale Form der Datenmenge als bidirektional automatische Verbindung zwischen virtuellem und physischem Objekt dar. Er kann somit ausschließlich durch die Einbindung sensorisch aufgenommener Daten in Echtzeit erzeugt werden, wobei noch eine gewisse Latenz für die Prozessierung der Daten eingeräumt werden muss. Diese Verbindung muss zwingend zu jeder Zeit quasikontinuierlich ablaufen, alle Prozess- und Elementdaten unterschiedlicher Phasen stehen miteinander in Verbindung. Die Bereiche des virtuellen und des physischen Objektes sind nicht voneinander isoliert, sondern vollumfassend verbunden. Aus einem Echtzeitabgleich der Daten des virtuellen mit dem physischen Teil wird eine kontinuierliche Verbesserung des virtuellen Modells erreicht.

5.2.2. Einbindung innerhalb von Cloud-Systemen

Volle Funktionalität kann in der Methode DTC somit erst dann erreicht werden, sobald eine bidirektional automatische Verbindung zwischen dem virtuellen und dem physischen Teil des Bauwerks besteht und die Daten auf einer zentralen Datenbank vorgehalten werden. Vor dem Hintergrund einer möglichst hohen Datentransferegeschwindigkeit und in Anlehnung an Technologien der Industrie 4.0 wird dies durch die Verwendung des in Kapitel 4.2.1 näher beschriebenen Cloud-Computing erreicht. Diesbezüglich werden die Digitalen Abbilder dabei gemäß Abbildung 5-3 auf Cloud-Plattformen vorgehalten.

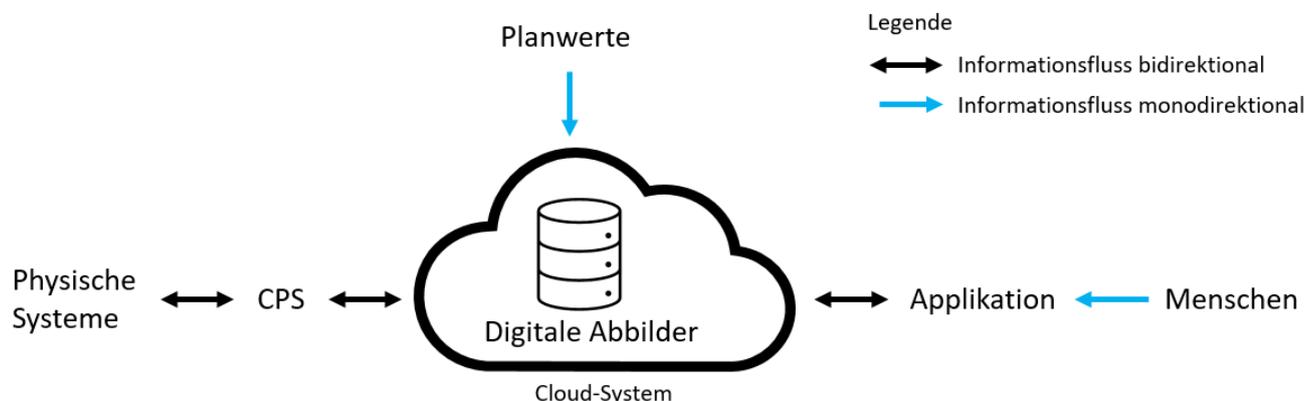


Abbildung 5-3: Digitale Abbilder innerhalb von Cloud-Plattformen²⁸⁷

²⁸⁷ Eigene Darstellung

In einer idealen IT-Infrastruktur sind Digitale Abbilder von allen dezentralen Orten erreichbar. Planwerte werden als Eingabeinformationen nach Bedarf übertragen und sichern folglich die stetige Aktualität der Digitalen Abbilder. Mittels Cyber-Physischer Systemen besteht eine kontinuierliche bidirektionale Verbindung der physischen zu den Cloud-Systemen. Es bestehen infolgedessen vernetzte Prozesse. Die CPS nehmen Daten aus den physischen Systemen auf und leiten sie an die Digitalen Abbilder weiter. Ebenso besteht ein entgegengesetzt gerichteter Informationsfluss für eine mögliche Steuerung der physischen Systeme durch das Digitale Abbild. Zu den Menschen als Informationsabnehmer besteht eine monodirektionale Verbindung, da sie aktiv Informationen über entsprechende Applikationen auf Endgeräten anfordern müssen. Zwar ist es möglich über die entsprechende Applikation jedwede Information automatisch und zeitnah für den Menschen bereitzustellen. Welche dieser Informationen angefordert wird, ist jedoch durch den Menschen festzulegen. Somit wird der Mensch automatisch mit dem jeweils aktuellen Status derjenigen Informationen versorgt, die explizit für die jeweilige Systematik der vorliegenden Arbeit benötigt werden. Die genannten Applikationen bilden somit die Mensch-Maschine-Schnittstelle.

Für eine effiziente Bearbeitung ist die Cloud-Plattform an ein System von Erfahrungswerten angeschlossen, sodass zu jedem Zeitpunkt stets aktuelle Informationen aus früheren oder auch aktuell laufenden Projekten abgerufen werden können. Ob dabei die Cloud-Plattform selbst das System zum Vorhalten der Archivierungsdaten ist oder ob diese auf anderen Systemen vorgehalten werden, ist grundlegend zu durchdenken. Zwar birgt die Möglichkeit alle Daten über Cloud-Systeme vorzuhalten, den Vorteile eines schnellen und konsistenten Datenzugriffs, die entsprechenden Kosten und die zu übertragenden Datenmenge ist hingegen groß.

Unabhängig des Speicherorts der Daten, werden sie durch analytische Verfahren prozessiert. Aufgrund der hohen, jedoch auch spezifischen Rechenoperationen sollte die Analytik entweder ebenfalls auf den Cloud-Systemen oder auf lokalen Computersystemen erfolgen, die für spezifische Rechendienste optimiert wurden. Die Ergebnisse werden wiederum auf die Cloud-Plattform zurückgespielt. Eine quasikontinuierliche Datenverbindung ermöglicht den Projektbeteiligten einen zeitnahen Zugriff auf die Datenbank projektspezifisch prozessierter Erfahrungswerte.

5.2.3. Mehrwerte und Risiken

Obwohl die Mehrwerte in der vorher genannten Einführung als deutlich überwiegend erscheinen, so bestehen durchaus Risiken, die eine entsprechende Systematik mit sich bringt. Daher soll nachfolgend zuerst konkret auf die Mehrwerte und anschließend auch technische sowie sozio-technische Risiken eingegangen werden, die bei einer entsprechenden Vorgehensweise auftreten können.

Ausgewiesene Mehrwerte des dargestellten Paradigmas sind unter anderem die Informationsreliabilität sowie die Verarbeitungsgeschwindigkeit. Die Informationsreliabilität setzt sich unter anderem aus der Vermeidung von Fehleingaben, der Minimierung von Manipulation und der

Unterbindung von Übertragungsfehler zusammen. Diese Anforderungen wurden als Kernprobleme aktueller Projektbearbeitung innerhalb der empirischen Untersuchung in Kapitel 2.3 genannt. Die Behebung dieser Problemstellung führt zu einer stetig hohen Datenkonsistenz.

Die Verarbeitungsgeschwindigkeit ist eine Verbindung aus der tatsächlichen Prozessierdauer sowie der vorgelagerten Fähigkeit sehr großen Mengen an inhomogenen Daten zu erfassen und diese zu bearbeiten. Dabei kann eine Vielzahl an Dateninput simultan prozessiert werden. Darüber hinaus werden Daten auf den Endgeräten zur Datenaufnahme vorprozessiert. Das Resultat ist eine Datenmenge, die bereits an Größe und Umfang geringer ausfällt, jedoch ebenfalls um abweichende Messungen bzw. „Ausreißer“ reduziert wurde. Es resultiert ein konsistentes Datenmodell geringeren Umfangs, woraus wiederum eine geringere Auslastung der Datenetze bei einer Cloud- resp. Fog-Computing-Lösung erfolgt.

Das Paradigma Digitale Abbilder bietet zahlreiche Chancen und Möglichkeiten. Dennoch können vereinzelt Risiken auftreten. Dazu gehört unter anderem die Notwendigkeit entsprechende Systeme innerhalb der jeweiligen Unternehmen zu etablieren, sofern sie noch nicht vorhanden sind. Das bedeutet eine umfangreiche Anpassung der bestehenden IT-Hard- sowie Softwarestruktur. Nicht jedes kleine oder mittelständige Unternehmen (KMU) wird zur Etablierung einer solchen Struktur in der Lage sein, da ebenfalls umfangreiche Kosten auftreten können. Sind die Unternehmen diesbezüglich nicht selbst in Lage, so können externe Dienstleistende hinzugezogen werden.

Ein weiter kritischer Punkt ist die Rechtslage bei der Wahl von Serverstandorten. Nach der Einführung des *Clarifying Lawful Overseas Use of Data Act*, kurz Cloud-Act genannt, wird seit dem Jahr 2018 den US-amerikanischen Behörden der vollständige Zugriff auf diejenigen Server ermöglicht, die zu Unternehmen mit Hauptsitz in den USA gehören. Dabei wird unter anderem auch der Zugriff auf Kundenschaftsdaten ermöglicht.²⁸⁸

Einer der wichtigsten Vorteile bei der Cloud-Prozessierung ist die Möglichkeit einer kumulativen und simultanen Auswertung von Daten. Auf diese Weise werden zeitgleich hohe Anforderungen an die Transparenz der einzelnen Unternehmensteile oder gar des ganzen Unternehmens gestellt, sofern unternehmensübergreifend Daten ausgewertet werden sollen. Dies ist der Fall, wenn für eine sinnvolle Auswertung die entsprechenden Analyse-Algorithmen je Anforderung nachjustiert werden müssen. Diesbezüglich wird es eine lange Zeit dauern, bis die entsprechenden Daten bestmöglich ausgewertet werden können. Denn nicht nur die schiere Menge an Daten ermöglicht eine solide Auswertung, sie müssen hingegen entsprechend aufbereitet und mit Meta-Informationen beschrieben sein. Darüber hinaus müssen für derart komplexe Auswertungen entsprechende Analyseverfahren optimiert werden. Nicht immer ist es direkt möglich aus den Ergebnissen vergangener Projekte diejenigen Informationen zu extrahieren, die für zukünftige Projekte sinnvoll erscheinen. Bei komplexen Projekten müssen auch nach der Projektphase solche Entscheidungen nachinterpretiert werden, die während der Bauphase getroffen wurden.

²⁸⁸ Vgl. IT-Service.Network.

Teils könnten bspw. Störfaktoren aufgetreten sein, die die Projektleitung zu dem entsprechenden Zeitpunkt beeinflusst haben, welche jedoch nicht ausreichend dokumentiert werden konnten.

Ähnlich verhält es sich mit Fehlern und Erfolgen. Solche können unter anderem aus spontanen Eindrücken vergangener Projekte resultieren. Eine nachträgliche Interpretation gestaltet sich als schwierig. Es ist nur bedingt möglich die größten Probleme herauszukristallisieren und diese auf nachfolgende Projekte zu projizieren.

5.3. Unternehmensbezogene Einführung

Nach der Herleitung der Methode der Digital Twin Construction, der Zugehörigkeit von Cloud-Services und der Darstellung von Vor- und Nachteilen, wird nun die Integration dieser Systematik in Unternehmensprozesse beschrieben.

Bei der Einführung der DTC in etablierten Unternehmen, sind unterschiedliche Bereiche vor allem im Hinblick auf informationstechnische Relevanzen zu beachten. Abbildung 5-4 zeigt neben dem Construction Digital Twin und dem physischen Zwilling ebenso die Dienste, resp. Service- und Supportprozesse, die auf Bauprojekten umgesetzt werden müssen. Zentrale Schnittstelle bildet der Construction Digital Twin, welcher wiederum in virtuelle und physische Baustellendaten unterteilt wird. Die virtuellen Baustellendaten bilden die Analyseeinheit und nutzen Methoden der Künstlichen Intelligenz oder der Big Data Analytics, um bspw. Prognosen zu erstellen oder Prozessoptimierungsvarianten zu berechnen. Physische Baustellendaten werden innerhalb des CDT verwendet, um Lebenszyklusdaten abzubilden.

Der physische Zwilling bildet die Baumaßnahme inklusive der entsprechenden Ressourcen Menschen, Geräte, Materialien und der Baustelle an sich ab. Es besteht eine kontinuierliche semantische Verbindung bspw. der innerhalb der DTC berechneten Analyse zur Bauausführung, sodass die entsprechenden Ressourcen stets auf einem aktuellen Stand gehalten werden. Neben dem Bau als solchem, wird ebenso die Planung dort einbezogen und entsprechend aktualisiert.

Als Services resp. Support gelten Dienste wie eine automatische Überwachung des Baufortschritts, eine Visualisierung, Sicherheitserkennungen in Echtzeit und eine integrierte Datenübergabe von der Bau- in die Betriebsphase. Darüber hinaus gilt eine stetige Verbesserung der eigenen Prozesse, welche über Kollisionsprüfungen, eine Optimierung innerhalb der Baustellenlogistik, eine stetige Anpassung der integrierten Terminplanung und dem webgestützten Austausch von Lieferkettendaten erfolgen sollte.

Es lässt sich schlussfolgern, dass höherer Integrations- und Automatisierungsgrade in einem verbesserten Serviceprozess resultieren, sodass Bauunternehmen die eigenen Ressourcen passender innerhalb derjenigen Aufgaben verteilen können, die vorwiegend von Robotern, Drohnen und Sensoren ausgeführt werden können sowie solchen, die menschlichen Einsatz erfordern.

Neben der direkten Anbindung an den Construction Digitale Twin ist somit ebenfalls der physische Zwilling mit den Service- oder Supportdiensten verknüpft.

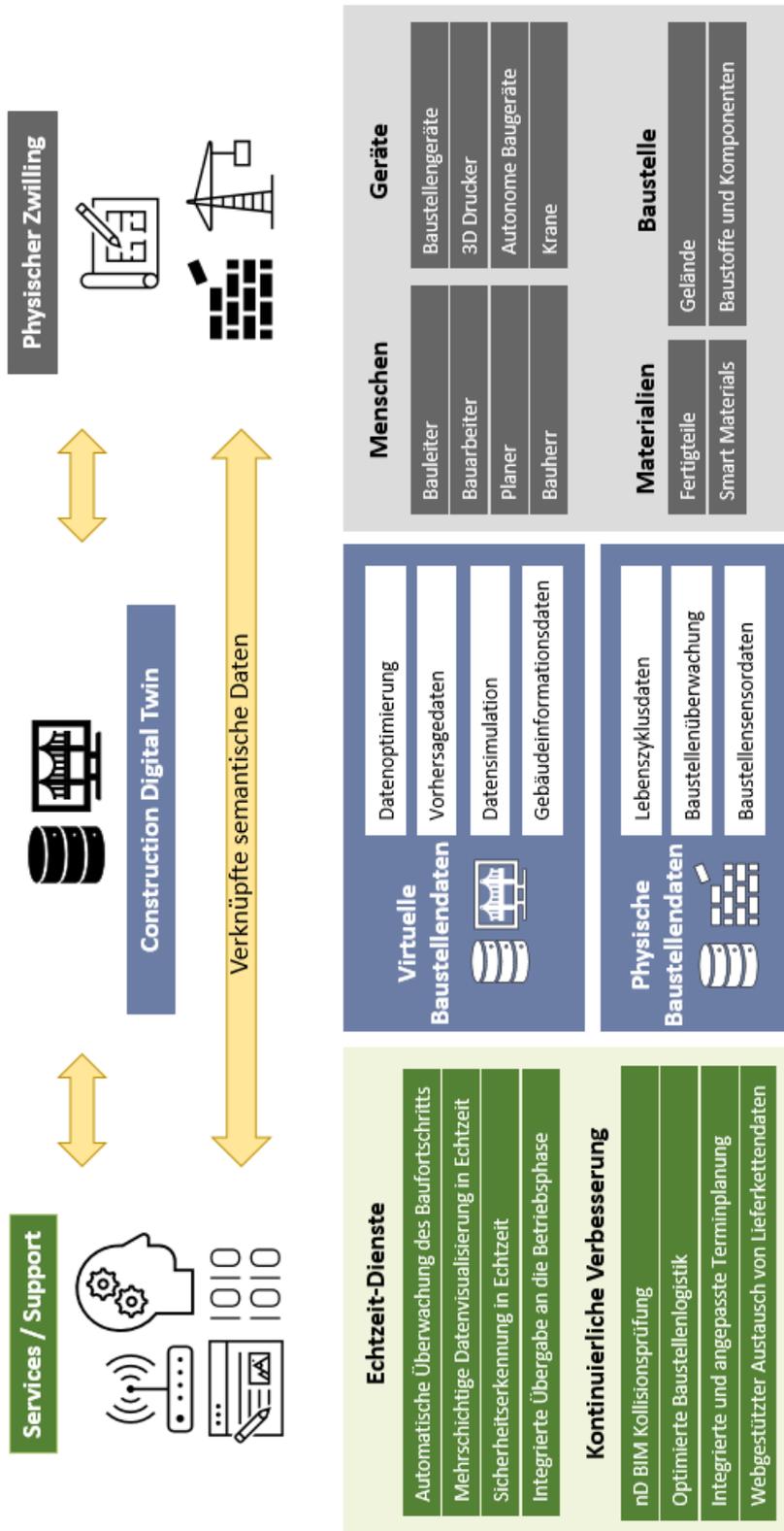


Abbildung 5-4: Daten und Services des CDT²⁸⁹

²⁸⁹ Eigene Darstellung in Anlehnung an Boje, et al. 2020, S. 10.

Sind die grundlegenden Themenbereiche so weit entwickelt, dass eine semantische Anreicherung der Objekte innerhalb der Modelle explizit möglich ist, ist eines der größten Probleme der BIM-Interoperabilität gelöst. Die Digitalen Abbilder sind so aufbereitet, dass sie für jeden Anwendungsfall entsprechend erweitert werden können. Daraus lässt wiederum sich schlussfolgern, dass ebenso BIM-Modelle als Digitales Modell, Digitaler Schatten oder Digitaler Zwilling eingesetzt resp. weitergeführt werden können, sofern sie anfangs entsprechend etabliert werden. Unter dieser Voraussetzung kann nun die Datenintegration während des Übergangs der unterschiedlichen Digitalen Abbilder betrachtet werden.

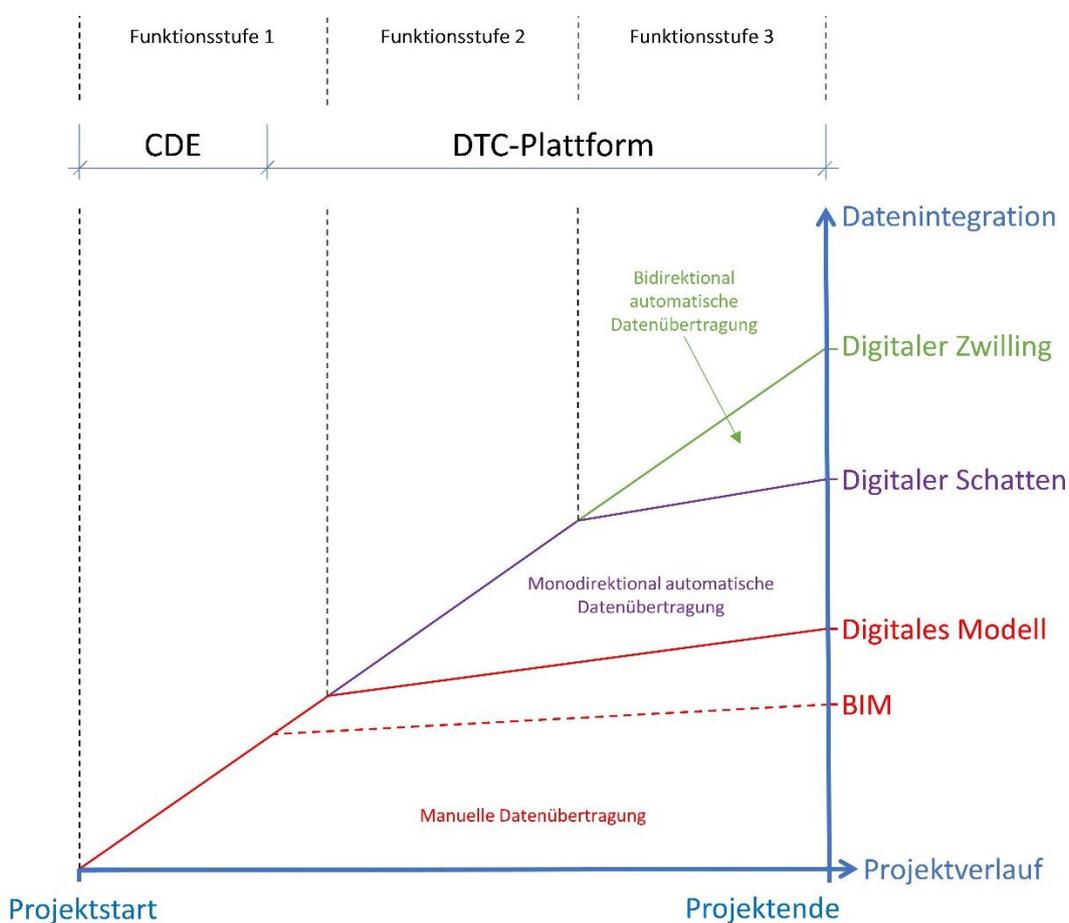


Abbildung 5-5: Dreistufiger Funktionsumfang der Digital Twin Construction²⁹⁰

Um das volle Potenzial der Methode Digital Twin Construction auszuschöpfen, sind alle Digitalen Abbilder auf sog. DTC-Plattformen vorzuhalten und zu verarbeiten. Diese Implementierung kann gemäß Abbildung 5-5 in drei Funktionsstufen erfolgen. Die zugehörige Struktur der Datenhaltung ist in Abbildung 5-6 dargestellt.

²⁹⁰ Eigene Darstellung

Je nach Projekt variiert die Verwendung der jeweiligen Daten-Plattform. So ist in einer frühen Planungsphase im Sinne der Funktionsstufe 1 die Verwendung einer DTC-Plattform nicht erforderlich. In einem solchen Fall ist es möglich das BIM-Modell auf Basis einer Common Data Environment (vgl. Kapitel 4.2.1) zu erstellen und dort vorzuhalten. Wird ein vergrößerter Funktionsumfang der Plattform erforderlich und ist die CDE nicht länger ausreichend, so sind die Modelldaten auf eine DTC-Plattform zu transferieren. Ab diesem Zeitpunkt liegt folglich ein Digitales Modell vor.

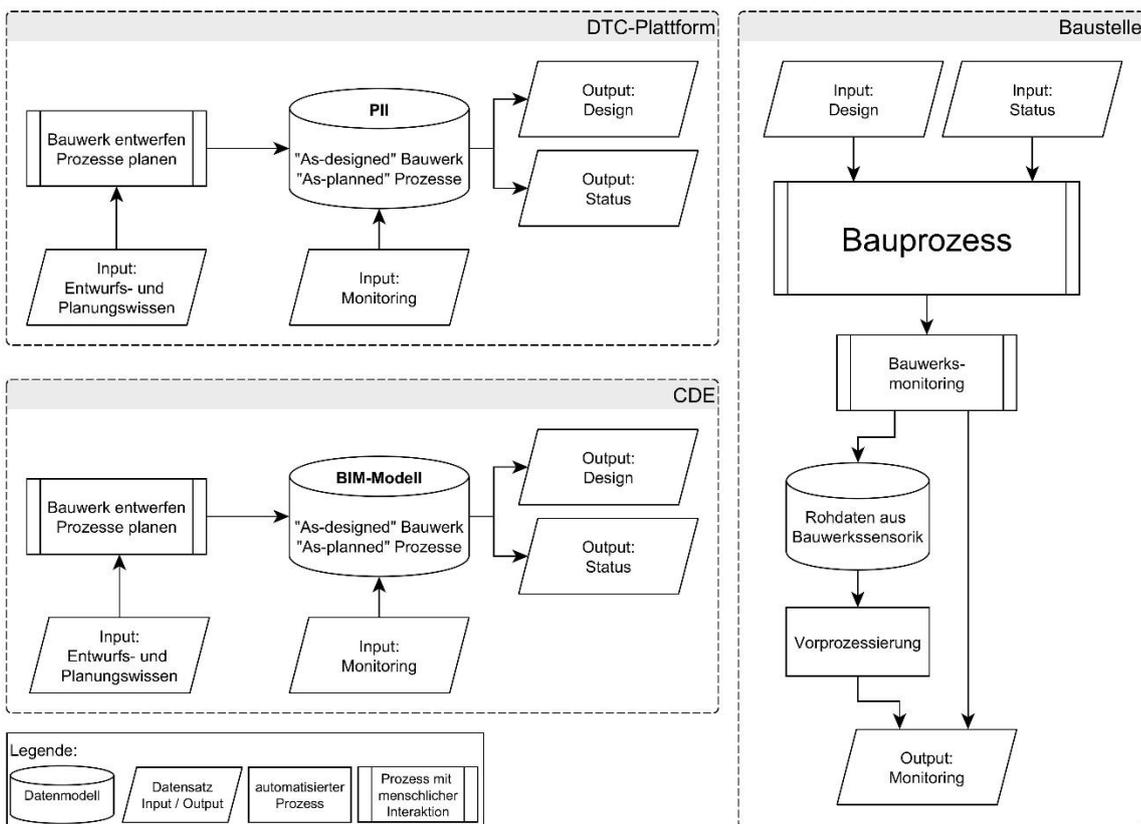


Abbildung 5-6: Struktur der Datenhaltung in Funktionsstufe 1²⁹¹

In der angesprochenen frühen Phase eines Projektes im Sinne des Entwurfsprozesses und somit innerhalb von Funktionsstufe 1 werden modellbasierte Verfahren für die Objektplanung verwendet. Dort können die Modelldaten zentral gespeichert werden.

Ein BIM-Modell kann diesbezüglich gemäß Abbildung 5-5 auf Basis einer Common Data Environment als objektorientiertes Modell erstellt und von anfangs 3D zu nD ergänzt werden. In der vorliegenden Arbeit wird die Bezeichnung nD verwendet, da auf der CDE Informationen über Kosten und Termine hinterlegt werden können, sofern der entsprechende Bedarf besteht. Die Datenintegration kann über den Funktionsumfang der CDE-Plattform nicht weiter steigen.

²⁹¹ Eigene Darstellung

Es besteht nur die Möglichkeit die Quantität der Daten entsprechend den vorhandenen Datenräumen manuell zu erhöhen.

An dieser Stelle ist zu bemerken, dass in der bis dato durchgeführten Art von BIM-bezogener Projektabwicklung eine Steigerung der Modellfunktionalität hin zu einem Digitalen Modell, einem Digitalen Schatten oder gar einem Digitalen Zwilling auch für eine Übergabe des As-built-Modells am Ende einer Bauausführung nicht notwendig ist. Für diese Übergabe ist der Funktionsumfang eines BIM-Modells auf Basis einer CDE ausreichend. Ferner sind eine Informationsaggregation und eine damit eingehende Steigerung des Funktionsumfangs eines BIM-Modells nach der Erfahrung des Verfassers dieser Arbeit in einem konventionellen GU-Vertrag nur bedingt anwendbar. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass bis dato zahlreiche grundlegenden Modell-Verwendungen in Bezug auf den Datenaustausch zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer nicht ausreichend rechtlich geklärt sind. Sobald alternative Vertragsmodell wie bspw. das *Early Contractor Involvement* oder *Integrated Project Delivery* Verwendung finden, ist es möglich frühzeitig ein gemeinschaftlich verwendetes Modell zu generieren, in das die entsprechenden Informationen eingepflegt werden können. Für weiterführende Informationen zu solchen vertraglichen Aspekten ist entsprechende Literatur heranzuziehen.

Bei der Verwendung eines BIM-Modells auf Basis einer Common Data Environment innerhalb von Funktionsstufe 1 kann keinerlei Datenverbindung zu Cyber-Physischen Systemen bestehen. Diese Form von Digitalen Abbildern wird daher vornehmlich zu denjenigen frühen Projektphasen gebildet, in denen ein physisches Modell noch nicht vorhanden ist. Im Zuge der Bearbeitung werden jegliche Informationen an das bestehende Modell aggregiert, die benötigt werden. Der Entwurfsprozess inklusive der zugehörigen Bauwerke im Zustand *As-designed* sowie der Prozesse im Zustand *As-planned* bleiben in der jeweiligen Form vorhanden und durchlaufen die notwendigen Leistungsphasen, bis sie zur Verwendung auf den Baustellen eingesetzt werden können.

Wird zu Anfang eines Projekts im Entwurfsprozess bereits eine etablierte Digital Twin Construction-Plattform verwendet, so ist es möglich, sowohl ein BIM-Modell als auch ein Digitales Modell im Zustand des *Project Intend Information* (vgl. Kapitel 4.4 - Digital Twin Construction) dort direkt vorzuhalten. In beiden Fällen werden die Daten von und zu den virtuellen Modellen gemäß Abbildung 5-6 via manuellem *Input: Design* und *Output: Design* auf die Baustellen übertragen. Das bedeutet einerseits, die Daten aus dem Digitalen Modell müssen manuell in den Bauprozess überführt werden. Andererseits bedeutet es, die Erfassung des Zustands des physischen Objekts auf den Baustellen erfolgt mittels Aufnahmegeräten, bei denen die Datenübertragung von der Baustelle ebenfalls vom Projektpersonal manuell als *Output: Monitoring* resp. in das virtuelle Modell in CDE oder DTC-Plattform als *Input: Monitoring* erfolgen muss. Je nach Art der Monitoringsysteme innerhalb der Bauausführung kann entweder eine (teil-) automatisierte Form der Erfassung erfolgen. Die Rohdaten aus dem Monitoring-Prozess werden automatisiert prozessiert, das Resultat steht für die Übertragung in das virtuelle Modell bereit. Alternativ wird eine konventionelle Art des Bauwerksmonitoring verwendet, bei der das Projektpersonal ganzheitlich manuell den Stand der Leistung resp. des Bauwerks erfasst und manuell in das virtuelle Modell überträgt.

Die Aggregation der Daten aus dem Bauwerksmonitoring führt nach Projektstart zu einem Anstieg der Datenmenge in der Datenintegration gemäß Abbildung 5-5 bei allen Arten von Digitalen Abbildern. Bei Abschluss dieser Funktionsstufe und wenn das Digitale Modell nur als solches genutzt wird, schreitet die Datenintegration in Richtung Projektziel weiter voran, zügiger als beim BIM-Modell, jedoch langsamer als in den nachfolgend beschriebenen Funktionsstufen in Verbindung mit den höherwertigen Formen der Digitalen Abbilder.

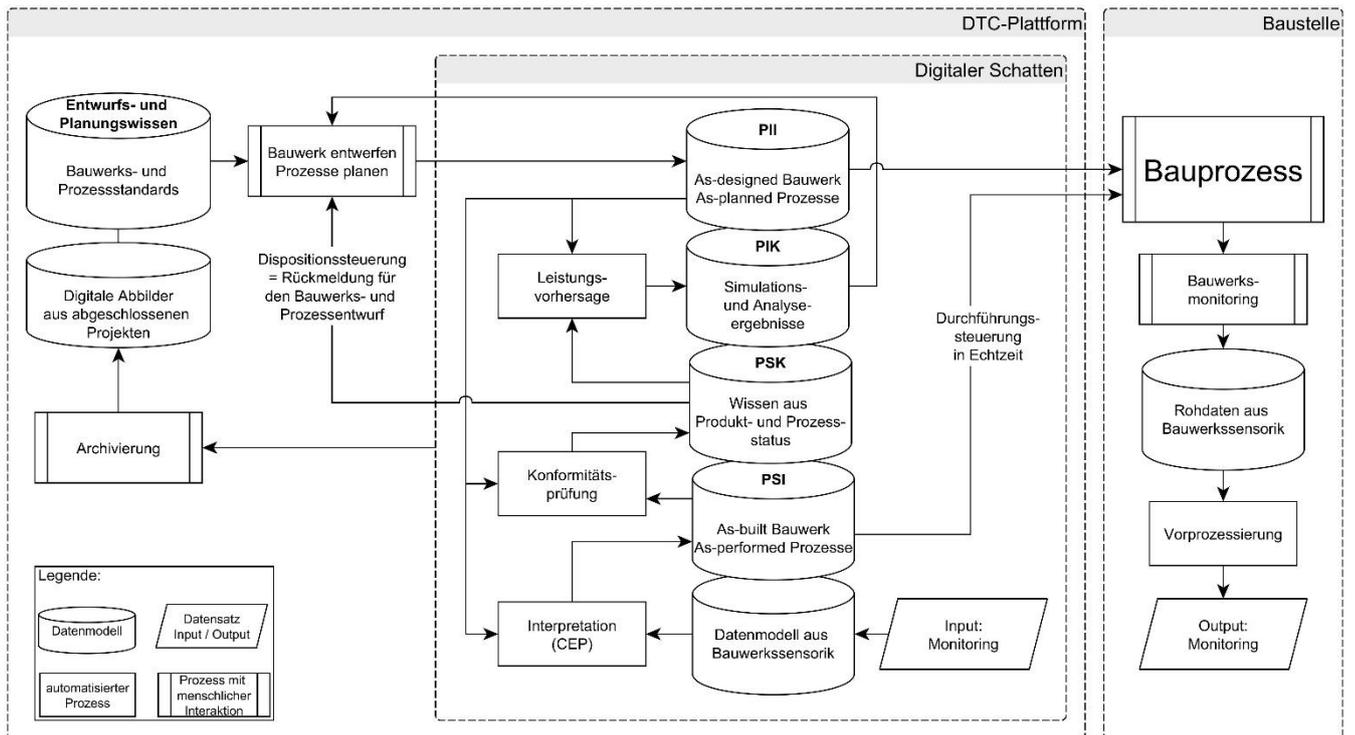


Abbildung 5-7: Struktur der Datenhaltung in Funktionsstufe 2 a²⁹²

Funktionsstufe 2 basiert gemäß Abbildung 5-5 auf der Verwendung eines Digitalen Schattens. Auf der verwendeten Digital Twin Construction-Plattform wird eine monodirektional automatische Datenübertragung erreicht (vgl. Abbildung 5-2: Das Paradigma *Digitale Abbilder*). Diesbezüglich werden die Modelldaten direkt auf der DTC-Plattform erstellt und bearbeitet. In Ausnahmefällen kann alternativ das Digitale Modell aus dem Entwurfs- und Planungsprozess von einer CDE auf eine DTC-Plattform überführt werden. Als Grundlage für die Datenhaltung gelten zwei unterschiedlichen Strukturen einer monodirektional automatischen Datenübertragung. Einerseits ist entsprechend Abbildung 5-7 eine automatische Anbindung der Planungsmodelle zu den Bauprozessen möglich. Die Übertragung der Daten aus dem Bauwerksmonitoring erfolgt dabei manuell. Andererseits erfolgt entsprechend Abbildung 5-8 die zuletzt genannte Anbindung von Bauwerksdaten aus dem realen Objekt in das virtuelle Modell automatisiert mittels

²⁹² Eigene Darstellung

Sensorik, die Übertagung der Modellinformationen aus der Planungs- resp. Arbeitsvorbereitungsphase in das Bauwerk erfolgt hingegen manuell.

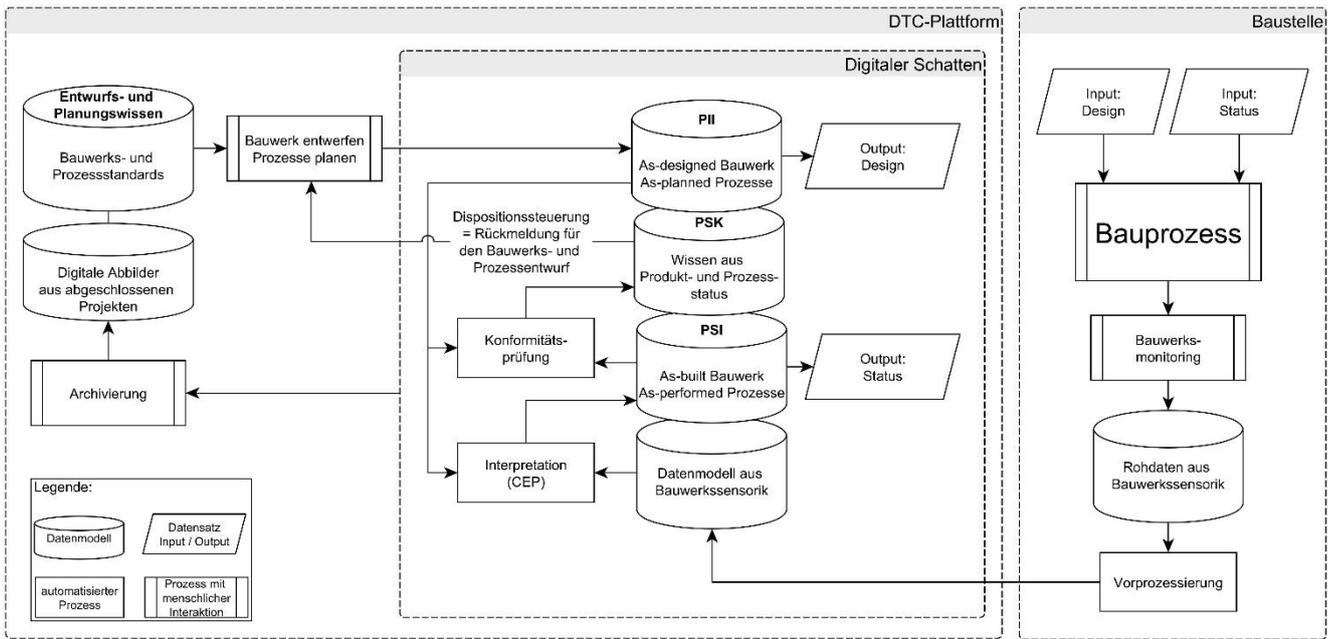


Abbildung 5-8: Struktur der Datenhaltung in Funktionsstufe 2 b²⁹³

Beiden Varianten liegen historische Daten als Digitale Abbilder auf der DTC-Plattform vor, die für den Entwurfs- und Planungsprozess verwendet werden. In einem solchen Fall ist es möglich auf die Informationen aus einem Archiv von fertiggestellten Projekten zuzugreifen. Dieses Archiv bildet den zentralen Speicherort für die Digitalen Abbilder vergangener Projekte, um deren Daten bei Bedarf zeitnahe und uneingeschränkt verwenden zu können. Folglich können in Funktionsstufe 2 Digitale Schatten darauf zugreifen und mit entsprechenden Methoden – bspw. mit Methoden der Künstlichen Intelligenz – Analysen durchzuführen und ggf. Prognosen zu erstellen.

Das resultierende Modell in der Planungsphase liegt im Zustand PII vor und weist somit die Informationen zum Entwurf des Bauwerks sowie zu den geplanten Prozessabläufen auf. Je nach automatischer Verbindung zwischen Digitalem Schatten und den Bauprozessen besteht entweder eine direkte Verbindung zum Bauprozess oder die Planungsdaten werden via Schnittstelle exportiert. Eine direkte Verbindung zwischen dem DS und dem Bauprozess kann bspw. durch den geplanten Herstellungsprozess einer Asphaltdeckschicht in einem Straßenbauprojekt mittels Asphaltfertiger beschrieben werden. Diesbezüglich wird der Prozess und damit die Steuerung des Fertigers anhand von GPS-Koordinaten geplant und direkt in die Steereinheit der

²⁹³ Eigene Darstellung

Maschine übertragen. Maschinen mit aktuellem Stand der Technik besitzen diesbezüglich die Möglichkeit der autonomen Fertigung.²⁹⁴

Der Bauprozess wird durch die im Projekt eingesetzten Monitoring-Systeme überwacht. Die entsprechenden Daten werden in den Messgeräten vorprozessiert, sodass nur die resultierenden Informationen in geringerer Größe und Menge zur Weiterverwendung vorliegen. Diese Informationen werden wiederum je nach Fall der vorliegenden Verbindung mittels Schnittstelle (vgl. Abbildung 5-7) exportiert oder mittels automatischer Verbindung (vgl. Abbildung 5-8) dediziert in das virtuelle Modell übertragen.

Im Digitalen Schatten werden die im Monitoring erfassten Informationen aufgenommen, mittels der Methode *Complex Event Processing* mit dem PII verglichen und interpretiert. Das virtuelle Modell bildet infolgedessen den Status PSI und besitzt die *as-built*-Informationen des Bauwerks sowie die *as-performed*-Informationen der Bauprozesse. Diese Daten werden wiederum je nach Form der Datenverbindung entweder via Schnittstelle oder mittels direkter Verbindung in die Bauprozesse übertragen, um wiederum eine Rückmeldung für den Bauprozess zu erhalten. Im Falle von Abbildung 5-7 besteht somit eine Rückmeldung als Durchführungssteuerung in Echtzeit. In beiden Formen der DTC-Plattform in Funktionsstufe 2 werden die Informationen aus dem virtuellen Modell im Zustand *Projekt Status Information* einer Konformitätsprüfung unterzogen. Nach einer bestätigten Konformität besitzt das virtuelle Modell den Zustand *Projekt Status Knowledge*. Mit diesem Schritt soll gewährleistet werden, dass unter anderem keine Mess- oder Übertragungsfehler aufgetreten sind. Das gewonnene Wissen wird nun als Form der Dispositionssteuerung in die Entwurfs- und Planungsprozesse übertragen. Hierdurch kann entweder eine Bestätigung der geplanten Information erreicht oder eine Anpassung notwendig werden. Als Beispiel kann ein Bauprozess herangezogen werden, bei dem sich Arbeiten verzögern und folglich der Bauablaufplan angepasst werden muss. Hieraus resultieren alternative Lieferzeiträume für Ressourcen, etc. Kombiniert man dieses Wissen aus der Ausführung des Projektes mit den Informationen aus der Entwurfs- und Planungsphase, so erreicht man einen Abgleich, der wiederum für zukünftige Projekte als gewonnenes Wissen herangezogen werden kann.

Das sogenannte *Projekt Intend Knowledge* (PIK) in Funktionsstufe 2a gemäß Abbildung 5-7 erweitert die Informationen aus der Entwurfs- und Planungsphase um Analyseergebnisse sowie eine Leistungsvorhersage. So sollten darin diejenigen Informationen enthalten sein, aus denen erschlossen werden kann, ob geplante Prozesse im Herstellungsprozess ausgeführt wurden oder warum die geplanten Prozesse nicht verwendet werden konnten. In aktuellen Projekten ohne automatisierte Datenerhebung oder Datenabgleich wird nur geringfügig Aufwand darin betrieben, festzuhalten, woraus Prozess- oder Planungsänderungen resultierten und warum dieser Schritt nötig wurde. Jedoch liegt nicht nur in der Abbildung des endgültigen Ergebnisses ein Mehrwert. Viel mehr enthält die Änderungshistorie denjenigen Mehrwert, der zukünftige Planungs- und Entwurfsprozesse beschleunigen kann und fehlerreduziert ablaufen lässt.

²⁹⁴ Vgl. Berns; Wolf & Decker Februar 2019.

Die dritte und höchste Funktionsstufe wird durch eine bidirektional automatisierte Datenübertragung zwischen virtuellem und realem Bauwerk erreicht. Abbildung 5-9 zeigt diesbezüglich die Kombination der jeweiligen monodirektional automatischen Verbindung aus den Abbildung 5-7 und Abbildung 5-8 zu einer ganzheitlich bidirektional automatischen Verbindung. Es herrscht der höchste Grad an Datenintegration gemäß Abbildung 5-5 im Digitalen Zwilling. Aus dem Baufortschritt aufgezeichnete Daten werden in Echtzeit und (quasi-) kontinuierlich in das virtuelle Modell des Digitalen Zwillings übertragen. Dort werden die Daten wiederum mit historischen Daten abgeglichen und eine mögliche Prognostizierung wird errechnet. Es gelten die Vorteile der bereits vorab beschriebenen Speicherung und Prozessierung der Daten aus den Änderungsprozessen, die aus den *Projekt Status Knowledge*-Daten, darüber hinaus ebenfalls aus den *Projekt Intend Knowledge*-Daten ermittelt werden können. Ursachen und Wirkungen aus möglichen Entwurfs- und Planungsfehlern werden mittels Algorithmen der Künstlichen Intelligenz mit denjenigen Informationen abgeglichen, die aus tatsächlichen Bauverfahren ermittelt wurden. Im Idealfall entstehen Vorschläge für entweder die Planungs- oder die Ausführungsphase, die aus der Auswertung einer Vielzahl an abgeschlossenen Projekten resultieren. Dabei wird beachtet, ob ähnliche Randbedingungen in den zum Vergleich herangezogenen Projekten vorlagen oder warum aufgrund spezifischer Anforderungen ganzheitlich oder teilweise abgewandelt geplant und ausgeführt werden musste.

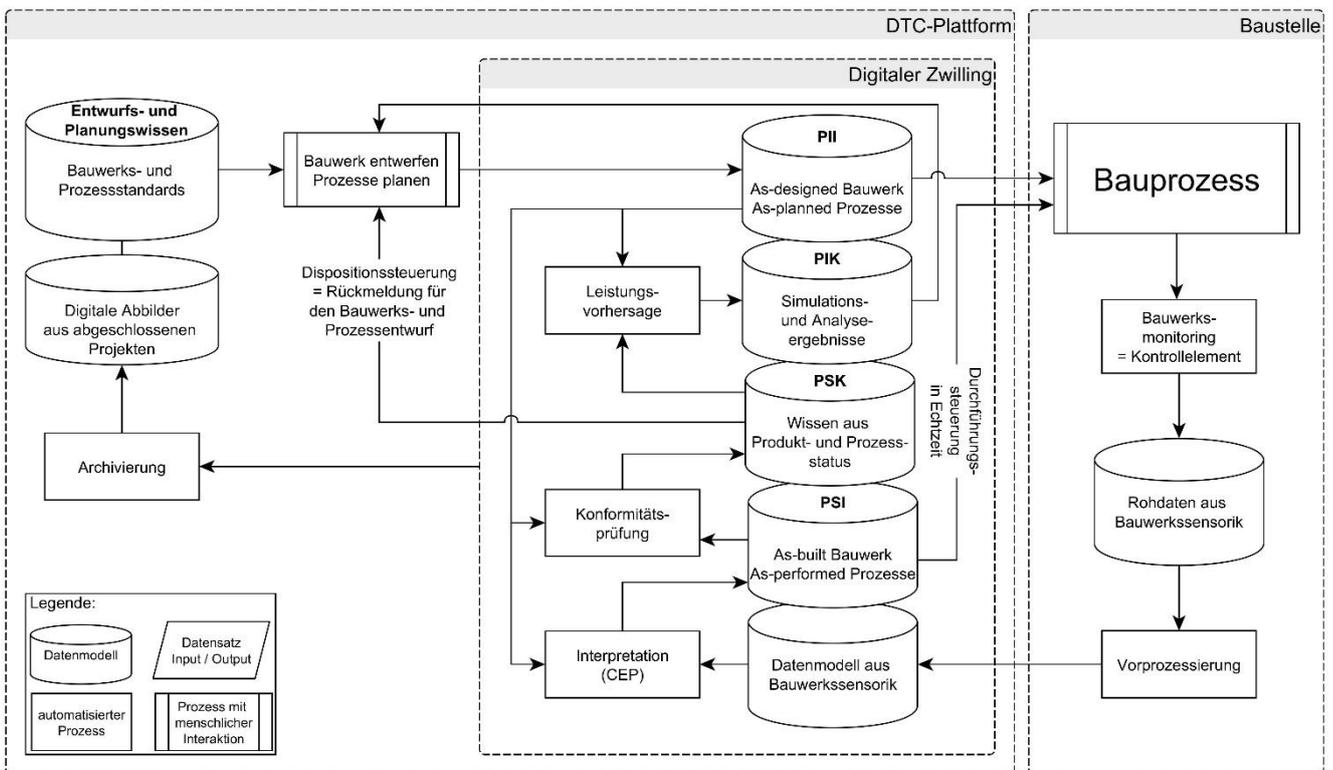


Abbildung 5-9: Struktur der Datenhaltung in Funktionsstufe 3²⁹⁵

²⁹⁵ Eigene Darstellung

5.4. Bauprojekt-Controlling auf Basis der Digital Twin Construction

In Kapitel 5.2 wurde das Paradigma Digitale Abbilder vor dem Hintergrund der Digital Twin-Construction eingeführt. Nachfolgend soll die gesamte Thematik in den Bereich des Bauprojekt-Controllings eingegliedert und erläutert werden.

Dabei wird zuerst auf die Prozessebene und folglich auf eine Darstellung der DTC in Kombination mit der beim Bauprojekt-Controlling vorherrschenden Prozessfolge eingegangen. Anschließend wird die zeitliche Ebene betrachtet. Darin wird dargestellt, wie eine Erhöhung der Automatisierung eine Verkürzung unterschiedlicher Latenzen ermöglicht. Anschließend werden beide Thematiken in ein System eines kombinierten Steuer- und Regelkreises einbezogen und erläutert. Abschluss bildet die Ableitung einer veränderten Entscheidungshierarchie.

5.4.1. Prozessebene

Durch die Einbeziehung der Digital Twin Construction in die Prozesse des Bauprojekt-Controllings wird vorwiegend der Aspekt der Datendurchgängigkeit erhöht. Diesbezüglich liegt die Verwendung der in Kapitel 5.2 beschriebenen DTC-Plattform nahe, auf der alle Daten prozessiert werden. Da dies bis dato noch nicht ausreichend entwickelt ist, wird eine Alternative benötigt. Hierfür eignet sich eine Plattform im Sinne einer CDE. Unter diesen Umständen sind ebenso die Prozesse anzupassen. Es wird infolgedessen eine reduzierte Verwendung des Paradigmas Digitale Abbilder auf den aktuellen Stand der Technik projiziert, um am Ende eine Validierung auf Basis einer Fallstudie zu erreichen.

Betrachtet man daher das Bauprojekt-Controlling (vgl. Abbildung 3-6: Phasen des Bauprojekt-Controllings) unter der Annahme der Weiterführung der in Kapitel 3.2 beschriebenen Arbeitsweise einer Generalunternehmung vor dem Hintergrund der Digital Twin Construction sowie dem Paradigma Digitale Abbilder, so können einzelne Prozesse näherungsweise den Zuständen der Digitalen Abbilder zugeordnet werden (vgl. Abbildung 5-10).

Das in Planung und Entwurf erstellte Digitale Abbild im Zustand PII wird für die Angebotskalkulation innerhalb des Bauprojekt-Controllings vor der Bauausführung verwendet. Nach erfolgreicher Projektakquisition wird diese Kalkulation in die Auftragskalkulation überführt. Dabei werden die jeweiligen Sichtweisen AK [0] und PK [0] gebildet. Die Arbeitskalkulation aus Prognosesicht umfasst im Bauprojekt-Controlling vor der Bauausführung Informationen über Veränderungspotenzial der Herstellkosten. Diese werden durch Analyseverfahren der Informationen von zuvor abgeschlossenen Projekten aus dem Archiv mit den dort jeweils aufgetretenen Risiken ermittelt.

Im Bauprojekt-Controlling während der Bauausführung werden die Soll-Auftrags-Arbeitskalkulation und die Ist-Prognose-Arbeitskalkulation als AK [i] und PK [i] weitergeführt. Dort fließen die kontinuierlich im Bauprozess aufgenommenen Informationen aus dem Modell im Zustand PSK periodisch ein. Um diesen Zustand an Informationsqualität zu erreichen, werden die Daten aus dem Bauwerksmonitoring in das Modell im Zustand *Project Status Information* übertragen und interpretiert.

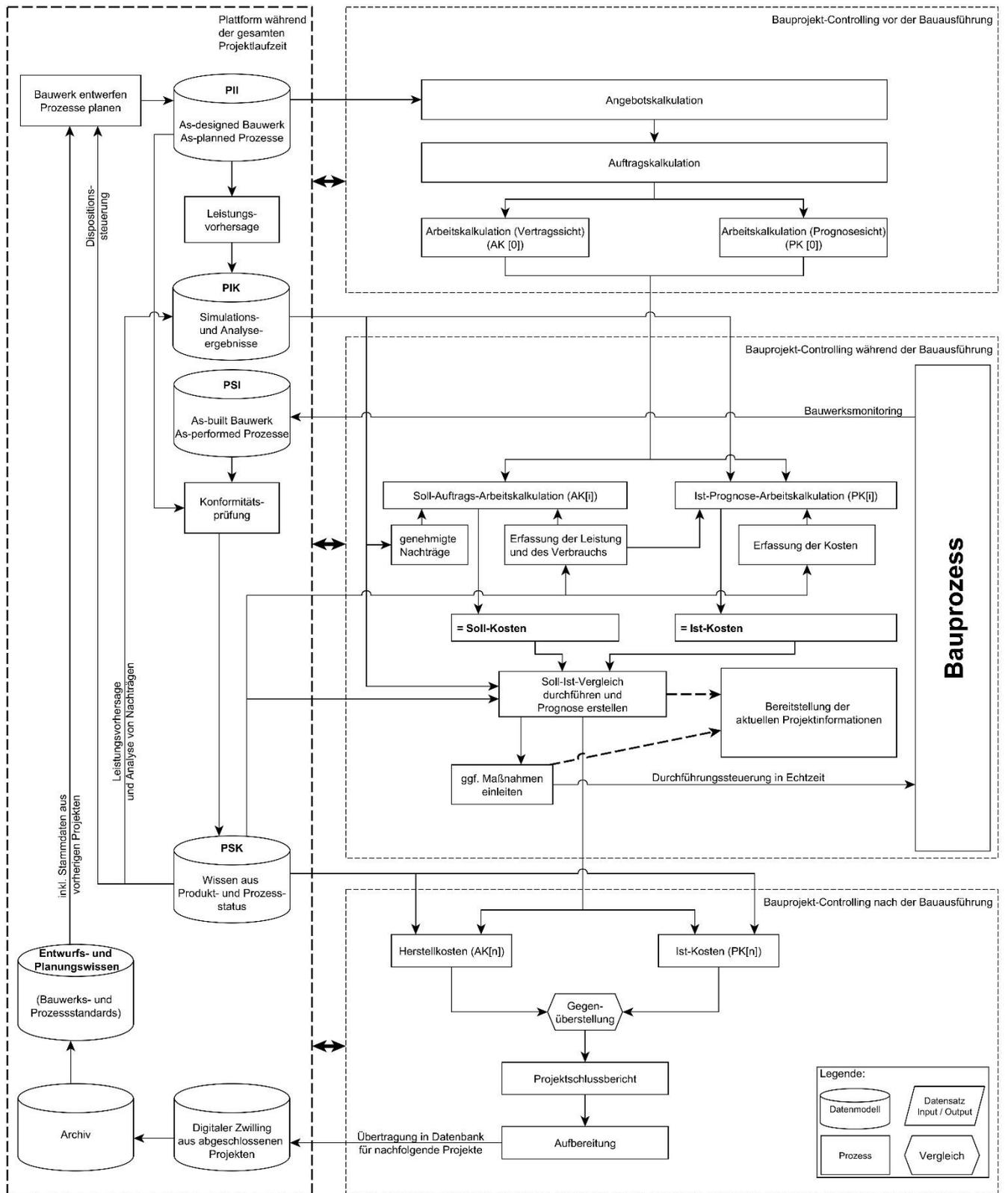


Abbildung 5-10: Bauprojekt-Controlling auf Basis der DTC²⁹⁶

²⁹⁶ Eigene Darstellung in Anlehnung an Jacob, et al. 2018, S. 527 sowie Girmscheid & Motzko 2013, S. 130.

Nachfolgend werden wiederum diese Informationen mit denjenigen aus dem Modell im Zustand *Project Intend Information* aus dem Entwurf auf Konformität geprüft und bei positivem Ergebnis in das Modell im Zustand *Project Status Knowledge* überführt. Diese Informationen stellen nun das Wissen der Bauausführung vor dem Hintergrund des Entwurfs dar. Eine Erfassung von Leistungen, die nicht im Entwurf geplant waren, sind zuerst zu prüfen, bevor sie in die Soll-Auftrags- resp. Ist-Prognose-Arbeitskalkulation überführt werden können. Je nach Kontinuität der automatisierten Leistungserfassung resp. des Bauwerksmonitorings bzgl. der Leistung, des Verbrauchs sowie der Kosteninformationen aus dem Rechnungswesen resultiert eine regelmäßige und zeitnahe Aktualisierung der AK [i] und PK [i]. Die zeitlichen Auswirkungen nehmen eine hervorgehobene Rolle ein. Diese werden später im Verlauf dieser Arbeit ab Kapitel 5.4.2 erläutert. Die Soll-Kosten aus AK [i] und die Ist-Kosten aus PK [i] werden einander gegenübergestellt und es kann ein zeitnahe Soll-Ist-Vergleich durchgeführt werden. Je nach Zeitnähe kann der Soll-Ist-Vergleich in Quasi-Echtzeit erfolgen.

Die ermittelten Informationen werden einerseits der Projekt- resp. Geschäftsleitung zur Verfügung gestellt. Hierzu sollten auch aus dem PIK errechnete Prognosen einbezogen werden, die durch Simulationen und Entscheidungsvorschläge für unterschiedliche Fälle ermittelt werden. Je nach Geschwindigkeit der Prognoserechnungen können diese zeitnah zur Verfügung stehen. Bei einer Verfügbarkeit der Informationen in Quasi-Echtzeit erreicht die Aktualisierung der Informationen aus der Bauausführung und die dadurch gegebene Durchführungssteuerung eine Systematik, die einem Regelkreis ähnelt. Hierauf wird im weiteren Verlauf der Arbeit dediziert eingegangen.

Die in den Zustand des PSK überführten Informationen werden für eine langfristige Leistungsvorhersage verwendet und in das Modell im Zustand PIK überführt. Hierzu werden nicht nur mögliche Auswirkungen durch potenzielle Störgrößen, sondern auch Analysen zu möglichen Nachträgen einbezogen und bewertet. Sind die Nachtragspotenziale geprüft und mit dem Auftraggeber besprochen, werden die entsprechenden Informationen wiederum in die Soll-Auftrags-Arbeitskalkulation einbezogen.

Das Wissen aus dem Modell im Zustand PSK fließt abschließend im Bauprojekt-Controlling nach der Bauausführung für eine Gegenüberstellung in die Herstellkosten (AK[n]) und Ist-Kosten (PK[n]) ein. Infolgedessen werden dort alle Informationen vorgehalten, welche innerhalb des Projektes erzeugt, erfasst oder verwendet wurden. Die Gegenüberstellung liefert der Projekt- sowie der Unternehmensleitung einen Überblick über das Ergebnis des Projektes.

Die endgültigen Informationen des Projekts müssen im Nachgang für die Überführung ins Archiv aufbereitet werden. Eine Ableitung von Erfahrungswerten, wie sich im konventionellen Bauprojekt-Controlling gemäß Abbildung 3-6: Phasen des Bauprojekt-Controllings verwendet wird, ist nicht notwendig, da relevante Daten in den finalen Digitalen Zwilling des Gesamtprojektes überführt und in dieser Form anschließend archiviert wird. In der finalen Form des Digitalen Zwillings sind die as-built-Information des Bauwerks, die as-performed-Informationen der Bauprozesse sowie diejenigen as-designed-Informationen des Bauwerks und as-planned-Informationen der Prozesse erfasst, die letztendlich umgesetzt wurden. Darüber hinaus werden dort

ebenso diejenigen as-designed-Informationen des Bauwerks sowie diejenigen as-planned-Informationen der Prozesse vorgehalten, die aufgrund unvorhersehbarer Störfälle aufgetreten sind. Als Beispiel kann hier die Sanierung eines Bestandsbrückenbauwerks herangezogen werden, bei dem während der Sanierungsphase in einem bis zum entsprechenden Zeitpunkt nicht zugänglichen Bereich eine starke Korrosion von Spanngliedern festgestellt wird, die die weitere Sanierung auf Monate verzögert, da die vorher durchgeführte Prüfung andere Ergebnisse geliefert hatte. Die Speicherung dieser Informationen ist notwendig, sodass bei zukünftigen Projekten eine sinngemäße Prognose mit entsprechenden Risiken ermöglicht werden kann.

5.4.2. Zeitliche Ebene

Wie im Zuge der empirischen Untersuchungen in Kapitel 2.3 dargestellt, verbringen die Mitarbeitenden der jeweiligen Unternehmen einen größeren Teil der Arbeitszeit mit der Suche nach Informationen oder dem Warten auf Rückmeldung. Die im vorherigen Abschnitt dargestellte Verfügbarkeit der Informationen auf Basis Digitaler Abbilder auf einer zentralen Plattform kann diese Zugriffs- und somit die Such- resp. Wartedauer reduzieren. Eine solche kontextabhängige, zentrale Speicherung der Informationen ermöglicht eine kontinuierliche und zeitnahe Datenverwertung und kann zu einer zeitnahen Bewertung von Störfällen oder auch Chancen innerhalb des Bauprojekt-Controllings führen. Voraussetzung bildet dabei die kontinuierlich reduzierte Dauer der Datenerfassung gemäß Abbildung 5-11. Wo vor einigen Jahren die Dauer der Datenerfassung verhältnismäßig viel Zeit in Anspruch genommen hat, so ist dies durch aktuelle technische Möglichkeiten in einem sehr viel geringeren Zeitraum möglich (vgl. Kapitel 4.2.1). Damit einher geht eine Steigerung der Datenmenge, die in dem jeweiligen Zeitraum aufgenommen werden kann. Folglich ist es möglich in geringen Zeiträumen Daten in hohen Ausmaßen nahezu im Exabyte-Bereich zu produzieren. Jedoch sind nicht alle diese Daten direkt verwertbar.

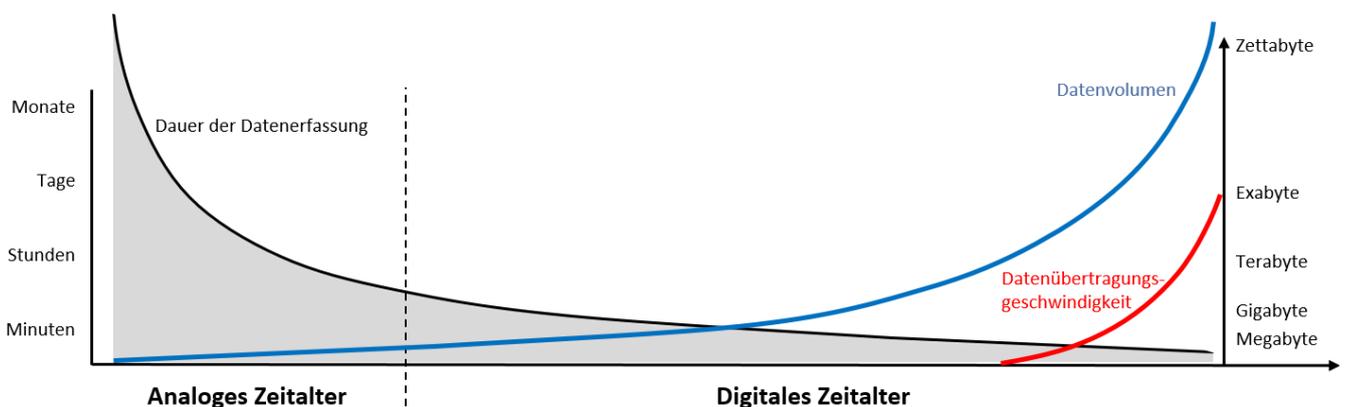


Abbildung 5-11: Dauer, Menge und Geschwindigkeit von Datenerfassung²⁹⁷

²⁹⁷ In Anlehnung an Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik WGP e. V. 2016, S. 24 und Tariq, et al. 2019, S. 1.

Während jeder Aufnahme erfolgen Messungenauigkeiten oder Messfehler, die wiederum durch die Prozessierung der Messdaten bereinigt werden müssen. Bei der Aufbereitung spielt die Rechenleistung der verwendeten Systeme eine ausschlaggebende Rolle. Teils ist es daraufhin notwendig Computer mit entsprechender Leistung am Ort der Messung vorzuhalten. Ist dies aus unterschiedlichen Gründen nicht möglich, kann auf die Berechnung in Serverzentren ausgewichen werden. Diese Möglichkeit wird jedoch durch die Notwendigkeit eingeschränkt, die Daten zu den Rechenzentren zu übertragen. Überschreitet die zu übertragende Menge an Daten die Übertragungsgeschwindigkeit des verwendeten Systems, so ist bei der Berechnung mit hohen Wartezeiten zu rechnen. Um diesem Problem vorzubeugen, wird sich an verschiedenen Stellen zur Verwendung der Edge-Computing Methode (vgl. 4.2.1) entschieden, sodass die Daten am Entstehungsort prozessiert werden und nur die resultierenden Informationen zu den zentralen Stellen übertragen werden, an denen die Weiterverarbeitung erfolgt.

Die zeitlichen Auswirkungen von Berechnungs- und Entscheidungsräumen sind abhängig von unterschiedlichen Faktoren. Beispielsweise kann der Zeitraum der manuellen Erfassung, Analyse und Verwendung der Informationen von auftretenden Ereignissen innerhalb einer Regelstrecke betrachtet und mit der Ausprägung unterschiedlicher Latenzen dargestellt werden. So beschreibt die Ordinate in Abbildung 5-12 den Nutzen resp. den Wert der Einbindung von Informationen eines Ereignisses in Abhängigkeit voranschreitender Zeit auf der Abszisse. Nach dem Eintreten eines Ereignisses vergeht ein unbestimmtes Zeitfenster, in dem die Daten des Ereignisses manuell erfasst werden. Nachdem diese Daten zur Verfügung stehen, erfolgt die Analyse, welche ebenfalls einen gewissen Zeitraum beansprucht. Die Entscheidungslatenz, die nach der Analyse verortet ist, beansprucht laut Aussagen der Teilnehmenden der zu Beginn dieser Untersuchung durchgeführten Fokusgruppe den größten Teil der Zeit Ereignisbewertung vor dem Einleiten der Maßnahmen und bedeutet einen hohen Verlust an Informationsgehalt. Nach Aussage eines der Ingenieure werden entsprechende Informationen über Ursachen, Auswirkungen und möglichen Maßnahmen zu entsprechenden Entscheidungsinstanzen übertragen. Anschließend wird Informationen in einem sog. Steuerungsgespräch von der Projektleitung erörtert und es werden ggf. (Gegen-) Maßnahmen eingeleitet. Alle diese Prozesse erfolgen in der Regel manuell und werden von Menschen ausgeführt. Sind (Gegen-) Maßnahmen überlegt und entschieden, werden diese eingeleitet. Eine entsprechende Wirkung der (Gegen-) Maßnahmen tritt wiederum erst verzögert ein. Das ist die sog. Anwendungslatenz. Es wurde somit eine bemerkenswerte Zeitspanne durchlaufen, ohne dass ggf. notwendige (Gegen-) Maßnahmen eingeleitet werden konnten. Der zeitliche Fortschritt kann in der Konsequenz in manchen Fällen bereits dafür gesorgt haben, dass Maßnahmen, die gegen ein aufgetretenes Ereignis positiv auf das gesetzte Projektziel wirken können, nur geringfügige Auswirkungen erreichen konnten. Diese These unterstützend, geht aus der Fokusgruppe hervor, dass innerhalb der genannten Steuerungsgesprächen teils keine Maßnahmen umgesetzt werden können, da die entsprechenden Gespräche lange Zeit nach den aufgetretenen Störgrößen stattfinden und daher die Bau-

prozesse zu weit fortgeschritten sind, sodass einzuleitende Maßnahmen nur geringe Erfolgsaussicht hätten. Steuerungsgespräche werden nach Aussage der Ingenieurinnen und Ingenieure meist nur zu einer historischen Korrektur resp. Dokumentation genutzt.²⁹⁸

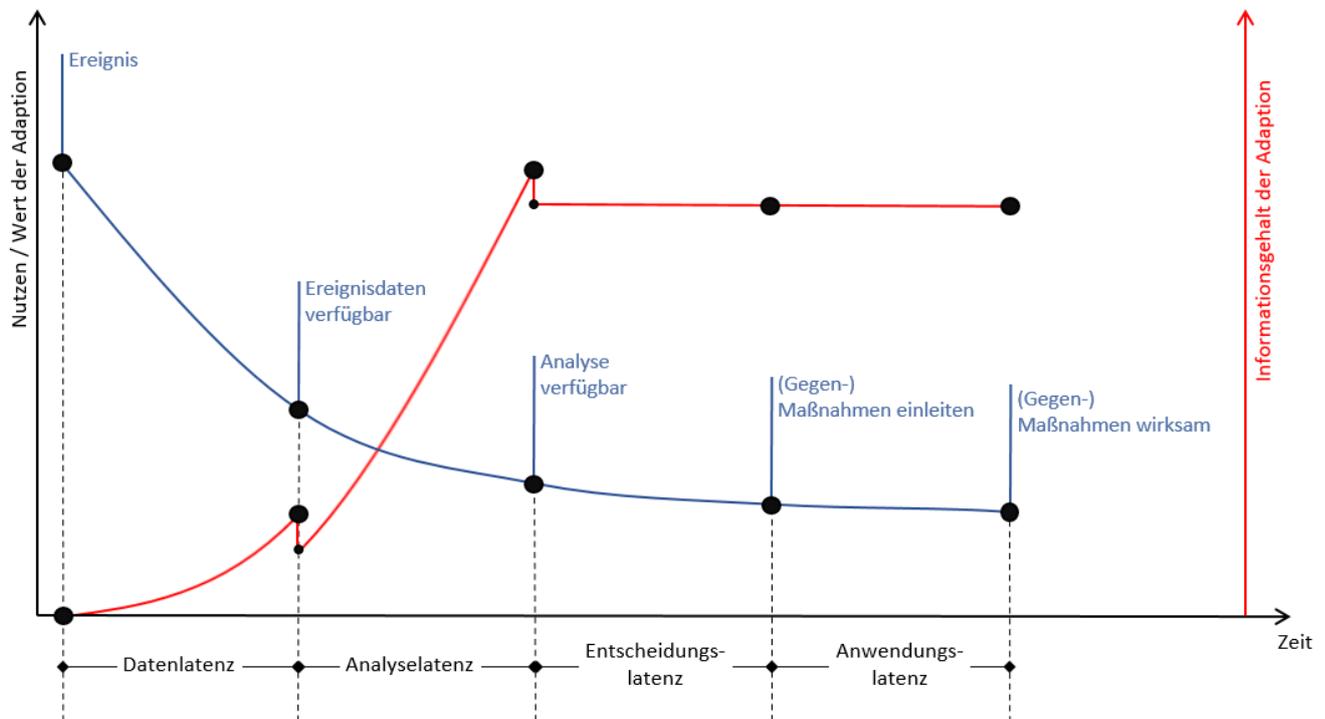


Abbildung 5-12: Manuelle Verarbeitung von Informationen bei auftretenden Ereignissen²⁹⁹

Abbildung 5-12 beinhaltet über die beschriebenen Latenzen hinaus ebenfalls die Interpretation des Informationsgehalts der Daten, die aus dem auftretenden Ereignis abgeleitet werden können. Ab dem Zeitpunkt des Eintretens des Ereignisses steigt der Informationsgehalt über das Ereignis an. Es wird angenommen, dass der Informationsgehalt überlinear steigt, da mit zunehmender Datenmenge auch das Verständnis für unterschiedliche Zusammenhänge steigt. Nach dem Ablauf der Datenlatenz stehen die Informationen für eine Analyse zur Verfügung. Aufgrund manueller Verarbeitung der Daten, ist ein Verlust mancher Informationen möglich. Dieser Verlust tritt ebenfalls nach Abschluss der Analyse auf, da die Informationen von Expertinnen und Experten zu dem Projektpersonal übertragen und dort neu interpretiert werden müssen, sofern es sich um unterschiedliche Personen handelt. Der Informationsgehalt nach der Analyse bleibt fortschreitend auf demselben Niveau. Bis die Maßnahmen hinreichend wirksam sind, sind die

²⁹⁸ Wortlaut: „Also wir nutzen meiner Meinung nach, also ich bin da sehr selten [...] bis jetzt dabei gewesen, aber ich finde wir nutzen es (das Steuerungsgespräch, Anm. d. Verfassers) mehr als - na was soll ich sagen - mehr so als historische Korrektur der Daten und finde mal raus und plausibilisiere mal ein wenig zur Steuerung. Also ich fühle mich nicht gesteuert durch die Gespräche, sagen wir mal so. [Sic!]“

²⁹⁹ Eigene Darstellung in Anlehnung an Hackathom 2003.

Analysedaten des Ereignisses je nach Datenverwaltung unvollständig oder ggf. bereits veraltet. Sie ermöglichen beim Auftreten erneuter, jedoch ähnlicher Ergebnisse wiederum einen verzögerten Beginn und fordern möglicherweise ebenso die Wiederholung einzelner Analyseverfahren.

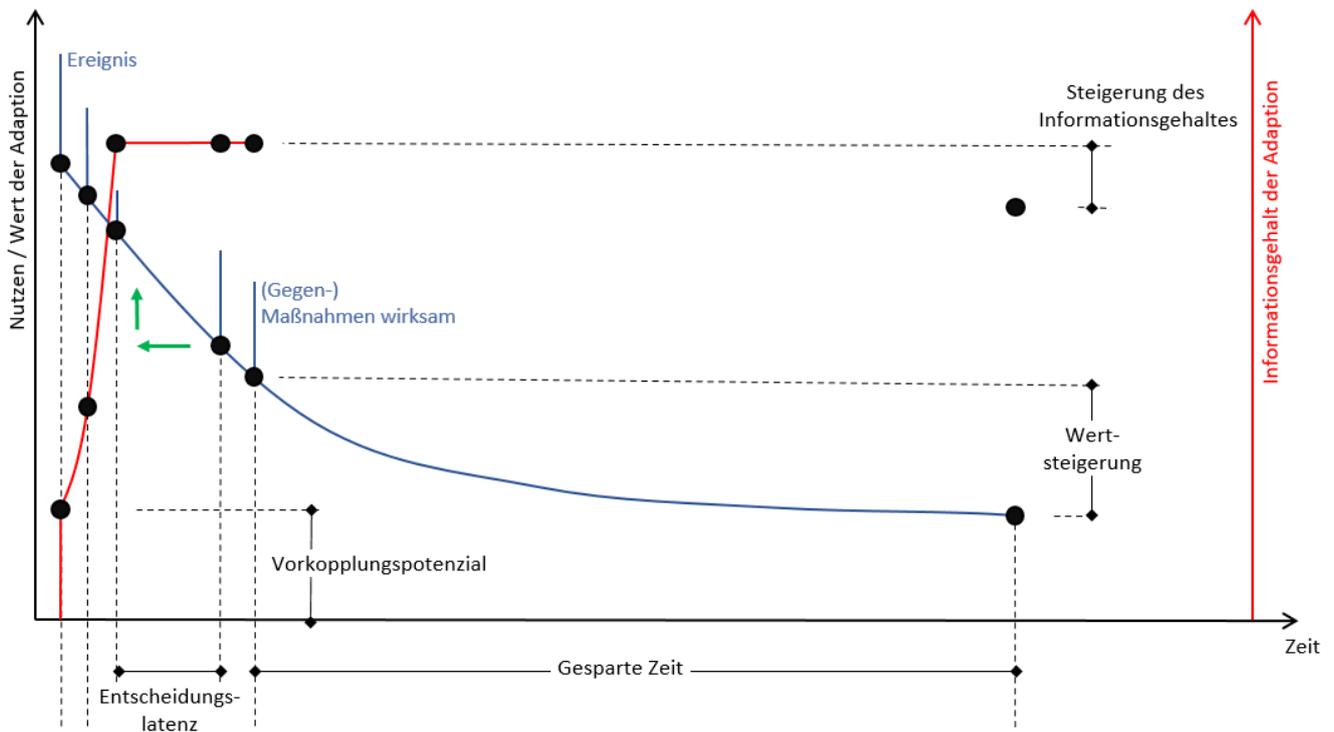


Abbildung 5-13: Automatisierte Verarbeitung von Informationen bei auftretenden Ereignissen³⁰⁰

Durch die Verwendung einer automatischen Datenaufnahme und -verarbeitung ergeben sich Änderungen der einzelnen Latenzen (vgl. Abbildung 5-13). Durch echtzeitfähige und integriert arbeitende Systeme verringern sich die Latenzzeiträume und es verschiebt sich der Zeitpunkt, zu dem der jeweilige Prozess erfolgen kann. Der Nutzen resp. der Wert der Adaption eben dieser Prozesse im gesamten Verarbeitungsprozess der Ereignisse steigt. So kann bspw. zeitnah nach dem Auftreten des Ereignisses eine Analyse gestartet werden, wonach ebenfalls frühzeitig ein Ergebnis vorliegt. Voraussetzung hierfür ist die Verwendung von leistungsfähigen Algorithmen, bspw. aus dem Bereich des maschinellen Lernens oder Analysen aus dem Bereich Big Data.

Die Entscheidungslatenz verringert sich im Allgemeinen nur geringfügig, sofern sie innerhalb der Durchführungssteuerung von Projektbeteiligten getroffen wird. Aufgrund der menschlichen Interaktion erfolgt dieser Prozess nicht so zeitnah, wie es eine Automatisierung erreichen könnte. Je schneller jedoch die jeweilige Entscheidung von den Projektbeteiligten getroffen werden kann, desto größer ist der Nutzen resp. der Mehrwert, den eine Gegenmaßnahme zu dem

³⁰⁰ Eigene Darstellung

aufgetretenen Ereignis erreichen kann. Dieses Potenzial wird durch die grünen Pfeile in Abbildung 5-13 angedeutet sowie durch die entsprechende Bezeichnung aufgezeigt.

Verfolgt man eine ganzheitliche Einbindung von Automatisierungsmöglichkeiten und bedenkt in dieser Konsequenz das Treffen von Entscheidungen durch Algorithmen, so geht man in der Theorie davon aus, dass sich die Entscheidungslatenz weiter reduziert. Sie nähert sich dem Wert 0 an, wird ihn jedoch nicht erreichen. Die Entscheidungslatenz kann niemals 0 erreichen, da ebenfalls bei algorithmischen Entscheidungen Approximationen hinsichtlich der Zielerreichung errechnet und das Ergebnis mit der größtmöglichen Zielerreichung als Entscheidung getroffen wird. Somit ist die Entscheidungslatenz von den Faktoren Hardware und Software abhängig. Es besteht Bedarf an leistungsfähigen Rechnern sowie umfangreichen Algorithmen, um möglichst viele Variable in die jeweilige Approximation einbringen zu können. An dieser Stelle wird nicht weiter auf diesen Aspekt eingegangen, da er im Verlauf der Arbeit keine Bedeutung findet. Ferner bleibt der Mensch als entscheidende Instanz in Kraft.

Über die Wertsteigerung von Informationen und die dadurch eingesparte Zeit hinaus, ermöglicht eine automatische gegenüber einer manuellen Verarbeitung von Daten eine Steigerung der Datenqualität. Die Übertragung erfolgt konsistent und ohne Informationsverluste. Ferner resultiert eine Steigerung des Informationsgehaltes der Adaption der Ereignisinformationen. Ein Fehlverhalten wird verringert. Wenn bereits vor Auftreten eines Ereignisses Vorzeichen diesbezüglich erkennbar und diese durch automatische Analyse erfasst sind, so kann wiederum der Informationsgehalt über das Ereignis frühzeitig gesteigert werden und die Daten- resp. Analyselatenz verringert sich wiederholt. Dies wird durch die Einbindung des Vorkopplungspotenzials dargestellt.

Alle Prozesse der Bauausführung stehen in enger Wechselwirkung. Bei einer frühzeitigen Erkennung von Abweichungen des geplanten Bau- oder Prozess-Solls, ist man durch automatische Datenverarbeitung frühzeitig in der Lage mögliche Konsequenzen zu verringern. Diese Wechselwirkung lässt sich auf viele Bereiche der Projekte anwenden. Eine frühe Einbeziehung von Prognosewerten in die Entscheidungsfindung mit Unterstützung von Algorithmen kann von Vorteil sein, wenn man bspw. aus Wetterdaten oder Verkehrsprognosen Verzögerungen in der Lieferkette von Frischbeton aufzeigen könnte. Je nach Größe oder Komplexität der Bauprojekte ist eine solche Wechselwirkung der einzelnen Funktionsbereiche jedoch nicht immer eindeutig erkennbar. Abhängigkeiten werden teils erst spät realisiert. Es gilt somit eine gemeinsame Datengrundlage zu schaffen, die genutzt wird, um Fehlinformationen zu vermeiden.

5.4.3. Steuer- und Regelkreis im Bauprojekt-Controlling

Projiziert man die in Kapitel 3.1.2 beschriebene Systematik von Steuerung und Regelung innerhalb der Systeme des Bauprojekt-Controllings auf die Methode der Digital Twin Construction auf Prozessebene und nutzt dadurch die Geschwindigkeitszunahme durch die Verkürzung der vorab beschriebenen Latenzen, so können in einzelnen Controllingmechanismen Steuer- sowie Regelkreise erreicht werden.

Wie in Kapitel 3.2.3 beschrieben, stellen die Durchführungs- sowie die Dispositionssteuerung solche Steuerungseinrichtungen dar, die im Bauprojekt-Controlling verwendet werden können. Die in der Abweichungsanalyse verankerte Durchführungssteuerung hat einen direkten Bezug zur Bauausführung und ermöglicht folglich eine realistische Darstellung der aktuellen Situation der Ausführungsprozesse. Mit automatisierten Mechanismen des Bauwerksmonitorings lassen sich entsprechend der vorab dargestellten Zunahme der Prozessgeschwindigkeit geringe Durchlaufzeiten eines Zyklus der Durchführungssteuerung erreichen. Zu beachten ist jedoch die Notwendigkeit der Differenzierung der Daten aus der Leistungsermittlung. Je nach im Projekt und in der Abrechnung gewählten Abschlagszeitraum sind nur diejenigen Bereiche aus dem Bauwerksmonitoring zu verwenden, die benötigt werden. Die Verwendung einer zu großen Datenmenge verzögert die Auswertung und führt ggf. zu Inkonsistenzen. Als Beispiel kann die Erfassung eines Bauwerksausschnitts mittels TLS oder Befliegung via Drohne verwendet werden. Die dabei resultierende Punktwolke stellt den gesamten Ausschnitt dar. Auch wenn nur einzelne Bauwerksteile überprüft und gemeldet werden sollten, wird dennoch der gesamte in der Punktwolke dargestellte Bauwerksausschnitt in die Analyse einbezogen. Die Prozessierungsmenge und -dauer erhöht sich.

Die Dispositionssteuerung ermöglicht entgegen der Durchführungssteuerung keine geringe Durchlaufzeit einer ihrer Zyklen. Ihre Daten können zwar zeitnah und automatisiert in die Arbeitskalkulation übertragen werden. Der Turnus ist jedoch ungleich weiter gefasst, da in dieser Steuerungseinrichtung grundlegend Eingriffe in das Element der Planung erfolgen und diese vor dem Hintergrund der Betrachtung der Auswirkungen auf das Projektende getätigt werden.

Im Zuge einer zeitnahen und automatisierten Überwachung des Projektverlaufes entsteht eine systematische Rückkopplung der Baustellensituation. Dies ermöglicht eine kontinuierliche Regelung des Projektverlaufes auf Basis einer teils maschinellen Bewertung. Im Sinne der Elektrotechnik resultiert somit ein Regelkreislauf mit einer Stellgröße. Unter Einbeziehung der Prozessdarstellung eines Regelkreises mit Störgrößenaufschaltung kann infolgedessen das Bauprojekt-Controlling gemäß Abbildung 5-14 dargestellt werden.

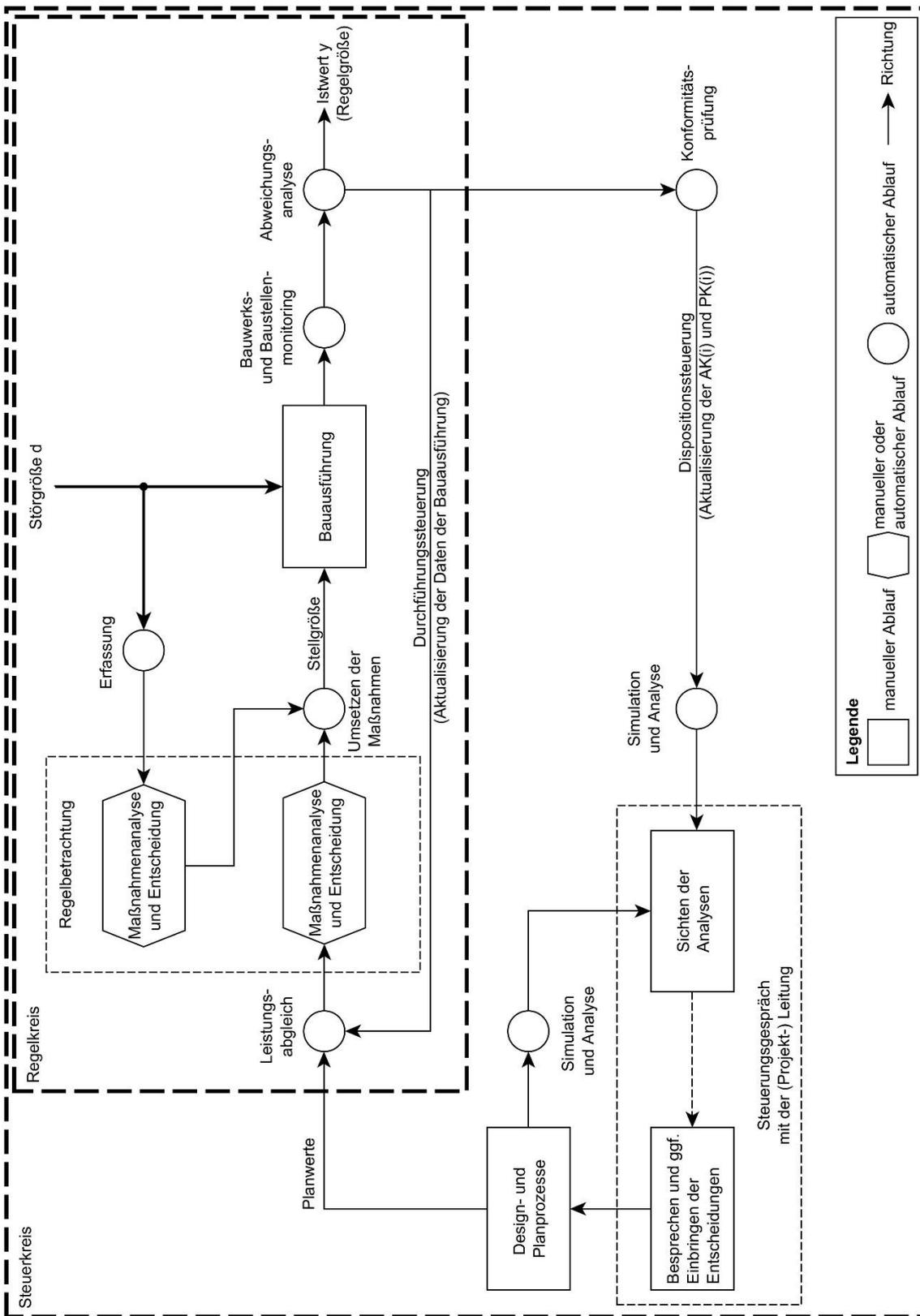


Abbildung 5-14: RK BPC während der Bauausführung mit Störgrößenaufschaltung³⁰¹

³⁰¹ Eigene Darstellung

Ausgang bilden die Daten aus den Design- und Planprozessen, die als Planwerte und damit als Führungsgröße in den Prozess des Bauprojekt-Controllings eingehen. Zum Zeitpunkt $t=0$ gehen diese Werte ohne Abweichungen von den Planwerten in die Bauausführung über. Kontinuierlich während des Herstellungsprozesses des Bauwerks werden Kosten und Leistungen unter anderem im Bauwerks- und Baustellenmonitoring automatisiert erfasst und gegenüber den Planwerten auf Abweichungen innerhalb der Abweichungsanalyse untersucht. Je nach Grad der Abweichungen werden die entsprechenden Ergebnisse innerhalb des Regelkreises analysiert. Im Sinne der Durchführungssteuerung dienen sie der Aktualisierung der Daten der Bauausführung. Im Leistungsabgleich werden die Ergebnisse aus der Abweichungsanalyse folglich gegenüber den Planwerten aufbereitet. Es folgt eine Regelbetrachtung, in der die Daten geprüft, in Maßnahmen transferiert und als Stellgröße im Prozess der Bauausführung umgesetzt werden.

Eine Betrachtungsweise des Regelkreises ist es, die im vorherigen Abschnitt genannte Anforderungen der Entscheidung durch einen Menschen zu vernachlässigen. Diesbezüglich würden in der Analyse der Abweichungen von den Planwerten unterschiedliche Szenarien berechnet und algorithmisch bewertet. Für die weitere Bearbeitung würde mit hoher Wahrscheinlichkeit dasjenige Berechnungsergebnis als Maßnahme getroffen, dass die höchste Zielerreichungswahrscheinlich aufweist. Dieser Fall würde dem Sinn eines Regelkreises nach der Elektrotechnik am weitesten entsprechen, da keine menschliche Interaktion notwendig ist und die Entscheidungslatenz am weitesten verringert wären. Die Dauer eines Zyklus des Regelkreises fiel niedrig aus.

Wird der Mensch als Entscheidungsinstanz nicht ganzheitlich vernachlässigt und die Methoden der Augmented Intelligence in die Entscheidungsfindung einbezogen, so können die Daten aus dem Leistungsabgleich automatisiert analysiert und mögliche Auswirkungen errechnet werden. Ebenfalls an dieser Stelle errechnen Algorithmen Entscheidungsvorschläge automatisiert, welche jedoch letztlich von der Instanz Mensch diskutiert und entschieden werden muss.

Tritt während der Bauausführung eine Störgröße auf, so wird diese im besten Fall bereits vorab ganzheitlich erkannt resp. es werden Anzeichen erfasst und entsprechend bewertet. Mögliche Auswirkungen werden wiederum berechnet, interpretiert und Entscheidungsvorlagen so aufbereitet, dass die Bauleitung unmittelbar reagieren kann. Eine Unterstützung durch Augmented Intelligence wäre an dieser Stelle ebenfalls denkbar, bei der vorab mögliche Auswirkungen errechnet und Entscheidungsvorlagen getroffen werden könnten. Im besten Fall würden dadurch negative Auswirkungen frühzeitig erkannt und Gegenmaßnahmen eingeleitet. Die Störgröße könnte in der Konsequenz vollständig kompensiert werden, wenn sie auf die Bauausführung trifft. Ist eine vollständige Kompensation nicht möglich, so werden die Auswirkungen durch das Bauwerks- bzw. Baustellenmonitoring aufgenommen und wiederum analysiert. Abweichungen werden dargestellt und aufbereitet, sodass entsprechend des Regelkreises mögliche Maßnahmen in der Regelbetrachtung entschieden werden können. Dieser Zyklus kann beliebig häufig durchlaufen werden.

Im Zuge der Bauausführung werden über die bisher angesprochenen Informationen hinaus auch solche erhoben, bei denen keine kontinuierliche Erfassung möglich ist. Dies gilt unter anderem für Rechnungen oder Nachträge. Die Behandlung dieser Informationen erfolgt als Folge dessen

nicht auf Basis eines Regel-, jedoch innerhalb eines Steuerkreises, da es sich zumindest im Bereich der Kosten um eine Regelmäßigkeit handelt. Diese gliedert sich hierarchisch oberhalb des Regelkreises, da in der Entscheidungsinstanz des letzteren stets die Informationen aus dem Steuerkreis eingebunden werden müssen. Werden Kosten erfasst oder die Notwendigkeit für Nachträge im Zuge des Bauwerksmonitoring erkannt und ausgearbeitet, so wird die Abweichung von der aktuellen Regelgröße analysiert. Unabhängig der Zuweisung, ob die Kosten auftraggeber- oder auftragnehmerseitig zu verantworten sind, werden diese auf Konformität zu den Planwerten geprüft und mögliche Auswirkungen auf die Bauausführung resp. das Bauprojektende werden berechnet resp. simuliert. Die Ergebnisse der Analyse wird im turnusmäßigen oder ggf. kurzfristig aufgesetzten Steuerungsgespräch mit der (Projekt-) Leitung besprochen. Mögliche Entscheidungen fließen in die Design- bzw. Planprozesse ein und werden als neue Planwerte wiederum in den Regelkreis der Bauausführungsbetrachtung eingeleitet. Sofern keine kurzfristige Entscheidung notwendig ist, werden mögliche Auswirkungen der neuen Planwerte simuliert und analysiert, sodass Optimierungen resp. alternative Vorschläge erschlossen werden können. Je nach Umfang und Auswirkungen dieser Ergebnisse werden sie abermals innerhalb eines Steuerungsgesprächs mit der (Projekt-) Leitung besprochen.

Alle vorab genannten Entscheidungsräume im Zuge der Regelbetrachtung oder der Steuerungsgespräche profitieren im Sinne der Digital Twin Construction von der Anbindung an eine zentrale Datenbank sowie eine visuelle Aufbereitung der Abweichungen. Über grafische Benutzungsoberflächen, sog. Dashboards, werden bspw. die Abweichungen von der auszuführenden Leistung visuell dargestellt. Eine solche Darstellung wird als sinnvoll erachtet, da es die Möglichkeit einer mehrschichtigen Datenvisualisierung in Echtzeit bietet. Ohne dies könnte im Sinne von BOJE, et al. von einem „Ertrinken in Daten“³⁰² gesprochen werden, wonach die Analyse aller auf die Baustelle einwirkenden Störgrößen und deren Ergebnisse einen hohen Aufwand für alle Projektbeteiligten bedeuteten und ferner einen großen Interpretationsspielraum böten.

³⁰² Boje, et al. 2020, S. 11.

5.4.4. Entscheidungen in Steuer- und Regelkreisen

In Kapitel 4.1 wurde die Problematik der Entscheidungen im Zuge der Industrie 2.0 angesprochen. Entscheidungen wurden zentralisiert, um das Wissen von Expertinnen und Experten zu sichern und eine Massenproduktion resp. Fließbandproduktion zu ermöglichen, die einen globalen, jedoch weitgemaschten Markt abdecken kann.³⁰³ Es war keine hohe Dynamik in der Produktion notwendig, da stets dasselbe produziert werden sollte.³⁰⁴ Seit der Industrie 3.0 ist dies nicht weiterhin möglich. Durch eine zunehmende Individualisierung der Produktion ist es in vielen Industriezweigen nicht ohne weiteres möglich, einzelne, zentrale Personen als Entscheidende in den jeweiligen Prozessen vorzuhalten. Es besteht in vielen Bereichen nun der Bedarf, dass die entsprechenden Ausführenden selbstständig in die teils höchst individuellen Prozesse eingreifen und dort Entscheidungen treffen, um neben den Wünschen der Kundschaft auch den Bedürfnissen der Prozesse zu entsprechen.

Projiziert man dies auf das Bauwesen, speziell auf Großprojekte im Infrastrukturbau, so wird mit einer steigenden Menge an zu treffenden Entscheidungen eine zentrale Steuerung zunehmend häufiger in Frage gestellt.³⁰⁵ Es lässt sich erkennen, dass die Beherrschbarkeit zentralistischer Systeme stets durch zunehmende Komplexität erschwert wird. Täglich müssen Entscheidungen getroffen werden, die nicht an zentrale Stellen delegiert werden können. Sie müssen von den Expertinnen und Experten vor Ort entscheiden werden. Trotzdem ist es wichtig, dass die getroffenen Entscheidungen zentral zusammenlaufen und überwacht werden. Es muss folglich ein zentrales Steuerungsorgan geben, das die Prozesse inklusive der jeweiligen Entscheidungen überwacht und eine Gesamtstrategie vorgibt.

Gemäß des RK BPC während der Bauausführung mit Störgrößenaufschaltung in Abbildung 5-14 können Entscheidungen innerhalb von Bauprojekten durch unterschiedliche Ebenen bewertet und letztendlich entschieden werden. Dabei wird eine Zuweisung von Entscheidungen zu denjenigen Personen mit der entsprechenden Kompetenz veranlasst. Zusätzlich wird das entsprechende Ergebnis jedoch zu einer zentralen Stelle weitergeleitet, sodass eine größtmögliche Transparenz besteht. Daraus resultiert eine verbesserte Verteilung der Funktionalitäten, sowie eine hohe Funktionsdynamik. Es wird eine verschwendungsfreie Einbindung von Mitarbeitenden durch Zuweisung der Informationen gewährleistet. Ferner müssen nicht die Hierarchieebenen Unternehmensleitung, Betriebsleitung (Bereichsleitung), Prozessleitung (Bauleitungsebene), etc. durchlaufen werden, sondern die Entscheidung kann getroffen werden, wo sie benötigt wird. Notwendige Entscheidungen können auf verschiedenen Ebenen und von verschiedenen Projektbeteiligten getroffen werden, welche jeweils unterschiedlich ihre Projektfunktionalitäten bereitstellen. Dazu gehören bspw. Bauleitende, Arbeitsvorbereitende, Polierinnen und Poliere aus unterschiedlichen Gewerken und noch viele mehr.

Projiziert man dies vor dem Hintergrund des Regelkreises aus Abbildung 5-14 auf ein einzelnes Bauprojekt, so wird eine Verkürzung des Erkennungszeitraums ermöglicht. Dies gewährleistet

³⁰³ Vgl. Bitkom 2014, S. 9.

³⁰⁴ ebenda

³⁰⁵ Vgl. Schuh, et al. 2020, S. 25.

diejenige Zeitnähe, die notwendig ist, um die tatsächliche Situation zum Zeitpunkt der Ausführung möglichst exakt abbilden zu können. Die eigentliche Steuerung baut dabei auf Abweichungsanalysen auf, die wiederum unmittelbar aus der Aufnahme der Bauausführung abgeleitet werden können. Wie eingangs angemerkt, kann eine quasikontinuierliche Aufnahme somit eine quasikontinuierliche Steuerung und daher eine Regelung ermöglichen. Für eine ideale Steuerungseinrichtungen beim Bauprojekt-Controlling auf Basis von Regelungsprozessen und Automatisierung sind jedoch die in Abbildung 5-15 dargestellten unterschiedliche Steuerungs- resp. Regelungsstrukturen zu beachten.

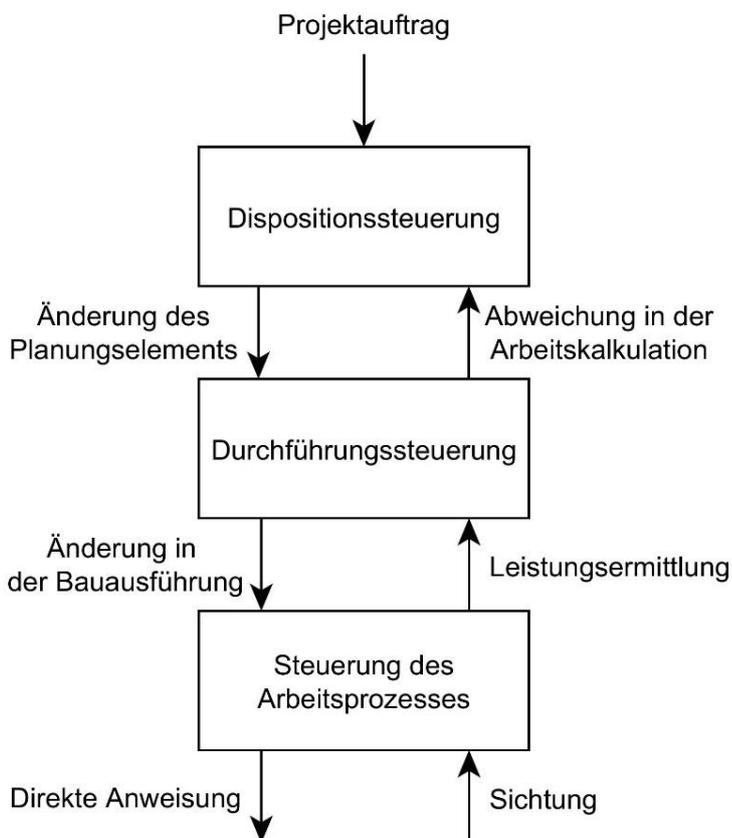


Abbildung 5-15: Hierarchische Steuerungs- und Regelungsstrukturen³⁰⁶

Die unterste Hierarchiestufe dieser Strukturen wird durch die direkte Betreuung von Ausführungsprozessen durch bspw. das auf den Baustellen eingesetzte Bauleitungspersonals oder durch Polierinnen und Poliere gebildet. Dort ist ein technisch automatisiertes Monitoring des Bauverfahrens nicht notwendig, da das entsprechende Fachpersonal eben dieses Monitoring übernimmt und ggf. direkt eingreifen kann. Der Mensch wirkt an dieser Stelle, an der Algorith-

³⁰⁶ Eigene Darstellung

men keine Entscheidung treffen, als Regler in dem System. Er erfährt die Resultate seiner Handlungen, indem er Beobachtungen anstellt und diese mit den Vorgaben vergleicht.³⁰⁷ Es existieren Technologien, die einzelne der hierunter gegliederten Arbeiten überwachen und auswerten. So werden beispielsweise die Geräteabmessungen eines Baggers bei Erdarbeiten gemäß der entsprechenden Sensorik gemessen und in einem virtuellen Modell dargestellt. Mögliche Auslenkungen werden in Displays dargestellt und die tatsächlichen Bewegungen des Gerätes durch die bedienende Person werden gespeichert, sodass sie im Nachgang ausgewertet werden können.

Die Durchführungssteuerung in der Hierarchiestufe darüber ermöglicht im idealen Fall durch eine quasikontinuierliche Aufnahme und Prozessierung der Daten eine Regelung der Bauausführung mittels Regelkreises. Dabei werden die Leistungen automatisiert ermittelt und Änderungen unmittelbar nach einer Analyse im Regler durch Maßnahmen der Änderung in der Bauausführung umgesetzt. Die Dispositionssteuerung ist dieser Art der Regelkette wiederum hierarchisch übergeordnet. Die Analyse der Leistungsaufnahme wird durch das Erkennen von Abweichungen in der Arbeitskalkulation gemäß der Soll-Auftrags-Arbeitskalkulation resp. der Ist-Prognose-Arbeitskalkulation ermittelt.

³⁰⁷ Vgl. Lunze 2020, S. 34.

6. Anwendung auf das Bauunternehmen

Der in Kapitel 5.4.3 in der Theorie entwickelte Regelkreis basiert auf den Forschungsfragen aus Kapitel 1.2, die sich wiederum gemäß den empirischen Untersuchungen und dem aktuellen Stand der Forschung ergeben haben. Ziel des vorliegenden Kapitels ist es aus diesem Grund, den entwickelten Regelkreis zu validieren und zu reliabilisieren. Diesbezüglich erfolgt anfangs eine Auswahl an Prozessen aus der Sphäre eines Bauprojektes aus Sicht eines Bauunternehmens, die eindeutig zu Resultaten aus den in der Empirie in Kapitel 2.3 herausgearbeiteten Defiziten zugewiesen werden können. Auf diesen ausgewählten Defiziten und den zugehörigen Prozessen eines Bauprojektes wird eine theoretisch ideale Umsetzung mit einer praktisch umsetzbaren Abgrenzung abgeleitet. Darüber hinaus werden Prüfziele beschrieben, nach denen eine Güteprüfung des durchgeführten Realisierbarkeitstest erfolgen kann. Die anschließende Beschreibung der Durchführung anhand zweier Fallstudien beginnt mit der Vorstellung der Projekte, die in den Fallstudien betrachtet werden. Dem folgt die Einordnung der betrachteten Systeme in die in Kapitel 5.3 beschriebenen Funktionsstufen mit einer definitiven Festlegung der durchführbaren Prozesse vor dem Hintergrund der Modelle in unterschiedlichen Status. Diesem wiederum anschließend erfolgt die detaillierte Beschreibung des Realisierbarkeitstests, welche mit der Bewertung der Ergebnisse vor dem Hintergrund der Prüfziele schließt.

6.1. Abgrenzung des Realisierbarkeitstests auf Basis der empirischen Untersuchung

Eine Betrachtung des ganzheitlichen Prozesses, den ein Bauunternehmen im Zuge einer Projektbearbeitung zu durchlaufen hat, würde einen Umfang erfordern, der den Rahmen dieser Arbeit überschreitet. Daher wird im Folgenden auf Resultate der empirischen Untersuchungen aus Kapitel 2.3 zurückgegriffen. Es werden infolgedessen Prozesse aus der Sphäre der Projektbearbeitung eines Bauunternehmens ausgewählt, die einen Großteil der angesprochenen Resultate abdecken.

In den empirischen Untersuchungen gestalten sich wiederholt einerseits die Aussage Projektpersonal müsse sich mit vielen bürokratischen Themen beschäftigen und könne somit nicht die jeweiligen Kernaufgaben bearbeiten. Hinzu kommt die Aussage Menschen seien bei der Dateneingabe eine bedeutende Fehlerquelle, da sie teils nur die für sie notwendigen Daten in die EDV-Systeme eingeben und daher im Allgemeinen Aufnahmen resp. Eingaben automatisiert erfolgen müssten. Gekoppelt mit der Problematik, dass aufgrund von inkonsistenten Daten resp. intransparenter Dateneingabe Fehler auftreten und eine zentrale Datenhaltung nicht erfolge, basiert die gesamte Umsetzung des Realisierbarkeitstests auf einer zentralen Koordinationsumgebung resp. einer Cloud-ähnlichen Lösung. Darüber hinaus weisen Aussagen von Expertinnen und Experten auf eine zu geringe Automatisierung bei der Ablage resp. Verwaltung der Daten hin. Gemäß deren Aussage erfolgten zu viele Prozesse innerhalb der aktuell umgesetzten Projekte überwiegend manuell, es seien zu wenige Prozesse automatisiert. Aus diesem Grund besteht für den Realisierbarkeitstest die Voraussetzung einer automatisch verarbeiteten und kontinuierlich aktuellen Datengrundlage.

In anderen Aussagen weisen sowohl einzelne Teilnehmende der Fokusgruppe als auch befragte Expertinnen und Experten auf die Notwendigkeit einer automatisierten Interpretation und Verarbeitung der verwendeten Informationen hin. Die im Projektabwicklungsprozess verwendete Informationserfassung erfolge aufgrund der manuellen Verarbeitung inkorrekt, es könnten keine konsistenten Resultate generiert werden. Aus unter anderem diesen Gründen wird im Realisierbarkeitstest die automatisierte Verarbeitung der Modelldaten inkl. einer automatisierten Einbindung von neuen Daten umgesetzt. Bei Abweichungen oder Fehlern sind automatisiert entsprechende Berichte zu generieren, sodass die entsprechenden Fehlerquellen manuell überprüft werden können. Diese Thematik betrifft sowohl den Planungs- als auch den Ausführungsprozess. Daher besteht die Vorgabe für den Realisierbarkeitstest, dass die Modelle aus der Design- resp. Planungsphase automatisiert auf Prozesse der Bauausführung übertragen und dort entsprechend verwendet werden können.

Im aktuellen Stand der Forschung beschäftigen sich nach BOJE, et al. zwar eine Vielzahl wissenschaftlicher Untersuchungen mit der Verwendung von sensorischen Aufnahmen als Quelle von Daten mit einer Erfassung in Echtzeit auf den Baustellen. Dabei beschreiben diese jedoch ausschließlich Aspekte der Sensornetzwerke, die jeweiligen Herausforderungen bei deren Verwendung, die Einbindung der Sensoren resp. Aktoren mittels des IoT und es werden Überlegungen zu Anwendungsszenarien angestellt. Die Überführung der Daten in Digitale Abbilder

resp. der Abgleich der Daten zwischen virtuellen und physischen Modellen wird hingegen nicht beschrieben.³⁰⁸

Diese Aspekte aus der Forschung lassen sich in den empirischen Ergebnissen die Erfassung von Daten betreffend, wiederfinden. Dabei wird von Teilnehmenden der Fokusgruppe sowie einzelnen Expertinnen und Experten angegeben, Projektpersonal müsse durch technische Möglichkeiten in der jeweiligen Arbeit so unterstützt werden, dass man dem eigenen Kerngeschäft wieder nachkommen könne und nicht durch manuelle Eingabe, Pflege und Verarbeitung von Daten so ausgelastet sei, dass das Personal Fehler begehe und die Daten inkonsistent resp. mangelhaft würden. Polysensorale Aufnahmen sowie automatisierte Dateneingaben ermöglichten nach Aussage mehrerer Teilnehmenden der Fokusgruppe das Erfassen zusätzlicher Informationen in kürzerer Zeit mit geringem Informationsverlust. Diese Aussagen bedingen für den Realisierbarkeitstest die Notwendigkeit der automatisierten Einbindung von Monitoringdaten aus Cyber-Physischen-Systemen und deren automatischer Konformitätsprüfung.

Ein weiterer von einem hohen Anteil der Teilnehmenden der Fokusgruppe dargebrachter Aspekt ist die Thematik der Projektsteuerung auf Basis von Informationen aus dem Bauprozess. Es wird angemerkt, ein negativer Projektverlauf werde teils erst sehr spät erkannt, da Informationen aus Steuerungsmechanismen ungenügend aufbereitet seien. Dem folge die Problematik, Ergebnisse oder Maßnahmen, die aus zugehörigen Steuerungsgesprächen resultierten, könnten nicht zeitnah und somit ebenfalls nicht effizient eingeleitet oder umgesetzt werden. Im Controlling-Prozess erkannte Probleme müssten jedoch frühestmöglich an die Ausführung weitergeleitet werden. Dabei sollten Entscheidungen direkt an das Bau-Soll über die Methode BIM geknüpft werden. Erfahrungsgemäß ermöglichte diese visuelle Komponente der BIM-Modelle eine vereinfachte Interpretation des Entscheidungsgegenstandes. Im bestmöglichen Fall seien Folgeprozesse erkennbar und die Auswirkungen einzelner Möglichkeiten könnten nahtlos in Entscheidungsprozesse einbezogen werden.

Diese Aspekte aus der empirischen Untersuchung erfordern für den Realisierbarkeitstest die automatisierte Übertragung in die Projektsteuerung. Eine automatisierte Interpretation von Daten aus dem Bauwerksmonitoring kann somit in die Entscheidungsfindung für die Bau- resp. Projektleitung einbezogen werden. Darüber hinaus wird eine visuelle Aufbereitung der Informationen in Echtzeit auf Basis der BIM-Informationen ermöglicht.

Ein weiterer Aspekt aus der empirischen Untersuchung betrachtet die Verwendung der Projektdaten für nachfolgende Projekte. Nach der Aussage der befragten Personen sei aufgrund von inkonsistenten Daten, intransparenter Dateneingabe sowie fehlender Dokumentationen keine Prognose innerhalb des Projektes möglich oder es könnten keine Schlüsse für nachfolgende Projekte gezogen werden. Im Zuge der Untersuchung wird aus diesem Grund der Bereich der Archivierung anhand von Modelldaten näher betrachtet.

³⁰⁸ Vgl. Boje, et al. 2020, S. 7.

Zusammengefasst ergeben folgende Prozesse den Untersuchungsgegenstand des Realisierbarkeitstests:

- 1) Innerhalb des Design- resp. des Planungsprozesses wird eine automatische Verarbeitung und Überprüfung der Modelldaten realisiert. Abweichungen werden automatisiert gemeldet, sodass diese von Personal betrachtet werden können.
- 2) Innerhalb des Ausführungsprozesses werden Monitoringdaten durch Cyber-Physische Systeme erfasst und einer automatischen Verarbeitung, Interpretation und Überprüfung zugeführt. Abweichungen werden automatisiert gemeldet, sodass diese vom Projektpersonal betrachtet werden können.
- 3) Es erfolgt eine automatisierte Übertragung der Informationen aus dem Bauwerksmonitoring in die Projektsteuerung resp. in die Entscheidungsfindung für die Bau- resp. Projektleitung auf Basis von BIM-Modellen.
- 4) Die Überführung der Projektdaten auf Basis eines BIM-Modells erfolgt automatisiert in einen Zustand der Archivierung auf einer entsprechenden Plattform.
- 5) Als Rahmen gilt die Verwendung einer zentralen Koordinationsumgebung auf Basis eines Cloud-ähnlichen Systems, auf dem die Voraussetzung der automatischen Verarbeitung und somit einer stetigen Aktualität besteht.

Aus den vorangehend aufgezeigten Fragestellungen der empirischen Untersuchungen wird nachfolgend ein idealer Fall der Verwendung der Methode der Digital Twin Construction gemäß Kapitel 5.2 anhand der ebenfalls vorab dargestellten, abgegrenzten Beispielprozesse beschrieben. Diese sollen in der vorliegenden Arbeit als Beispiel für möglichst ideale, jedoch abgegrenzte Prozesse dienen und besitzen daher keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

In einem solchen idealen Fall erfolgt die Design-Phase eines Bauwerks als Digitales Modell. Hierbei wird eine immaterielle Planung angenommen, die umgangssprachlich „auf der grünen Wiese“ bezeichnet wird. Es besteht somit kein Bauvorhaben, das innerhalb von Bestandsbauten geplant oder umgesetzt wird. Anhand des Digitalen Modells werden in den nachfolgenden Leistungsphasen durch erhöhte Informationsverfügbarkeit unterschiedliche Analysen durchlaufen, um das Design des Bauwerks, die Prozesse in der Phase der Bauausführung oder die Funktionalität in der Betriebsphase zu verbessern und im idealen Fall zu optimieren. Die jeweiligen Design- resp. Planungsmodelle in Form des Digitalen Modells werden je nach zyklischer Planungsanpassung auf die zentrale Projektplattform transferiert, sodass dort das jeweils aktuelle Modell als Single Source of Truth verwendet wird. Diese Tatsache der Erweiterung des Digitalen Modells auf der zentralen Datenplattform führt zur Umformung des Digitalen Modells in den Digitalen Schatten, da nun eine monodirektional automatische Anbindung zu Analyseverfahren besteht.

Alternative Untersuchungen wie bspw. Variantenuntersuchungen werden nur dann auf das zentrale System übertragen, wenn sie einen Einfluss auf eine im Planungsprozess getroffene Entscheidung ausüben oder aus einer solchen resultieren. Dies ist notwendig, um besondere Planungsperspektiven in zukünftigen Projekten zur Design-Phase hinzuziehen zu können. Zu

beachten ist diesbezüglich jedoch der Umfang der Aktualisierungen. Nicht jede Variantenuntersuchung sollte auf das zentrale System synchronisiert werden, da nicht jede Variante als sinnvoll erachtet resp. als Entscheidungsvarianz in zukünftigen Projekten hinzugezogen werden sollte.

Jede Übertragung von Modelldaten auf die zentrale Koordinationsplattform führt zu deren automatischer Konformitätsprüfung. Bei Fehlern oder Nonkonformität werden entsprechende Berichte automatisch generiert, sodass entsprechendes Personal benachrichtigt und die Abweichung dokumentiert wird.

Zu Beginn der Bauausführung erfolgt der Übergang des Digitalen Schattens in den Digitalen Zwilling. Eine Verbindung zwischen dem virtuellen und dem physischen Teil des DT besteht über Cyber-Physische-Systeme, spezifischer zwischen der Sensorik und Aktorik der Datenverbindung. Als Beispiel für einen Prozess, der nicht unmittelbar mit dem Bauwerk als solchem gekoppelt, jedoch in Form von Planprozessen als Teil des DT zu sehen ist, werden autonom agierende Tiefbaugeräte wie Radlader³⁰⁹ verwendet. Diese sind per bidirektionaler Datenverbindung mit den Digitalen Zwilling verbunden und werden dadurch mit den Daten aus den vorab berechneten Erdbewegungen versorgt, um Erdbauarbeiten durchzuführen und bspw. die notwendigen Baugruben herzustellen. Die Sensorik am Baugerät erfasst die abgeschlossene Arbeit und transferiert die bereits prozessierten Informationen in den virtuellen Teil des DT. Dort kann bspw. die Menge und der jeweilige Ablageort für eine solche Analyse genutzt werden, ob diese Bodenart entsorgt werden muss oder ggf. erneut eingebaut werden kann. Der Bau- oder Projektleitung steht über die bereits erwähnten grafischen Benutzungsoberflächen, die Dashboards, kontinuierlich der aktuelle Stand der wichtigsten Kennzahlen des Bauvorhabens zur Verfügung. Innerhalb dieser Darstellung ermöglichen es Methoden der Künstlichen Intelligenz Entscheidungsvorschläge für die Bau- oder Projektleitung zu erstellen, sodass diese entsprechend handeln kann. Ob solche Entscheidungsvorschläge für Bauprojekte durch Methoden der Künstlichen Intelligenz bereits selbstständig getroffen werden, soll an dieser Stelle nicht bewertet werden. Es besteht einerseits die Möglichkeit, dass letztendlich Menschen die Entscheidungsgewalt besitzen, was in der Forschung als *human in the loop*³¹⁰ bezeichnet wird. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit der selbstständigen Umsetzung der Berechnung der KI.

Im Verlaufe der Bauarbeiten erfolgt eine quasikontinuierliche Erfassung der auftretenden Kosten durch unter anderem die Erfassung von Lieferinformationen der Zulieferer, der Zeiterfassung der Personen in der Bauausführung oder eingehenden Rechnungen. Die Zeiterfassung des Personals sowie Lieferinformationen können individuell durch CPS auf den Baustellen erfasst werden. Eintreffende Rechnungen werden ebenfalls digital erfasst. Dies kann jedoch an einer zentralen Stelle oder durch Cloud-Lösungen erfolgen. All diese Informationen werden der Arbeitskalkulation zugeführt, deren internes Leistungs- und Rechnungswesen teils über Objektzuweisung, teils über zeitliche Zuweisung aufgebaut ist. Eine differenziertere Betrachtung wird an dieser Stelle aufgrund des Umfangs nicht vorgenommen.

³⁰⁹ Zum aktuellen Zeitpunkt ist einer solcher Prototypen unter der Bezeichnung „Volvo LX03: Autonomer Radlader mit E-Antrieb“ in gängigen Medien zu finden

³¹⁰ Vgl. Kirste 2019, S. 61.

Im Verlaufe der Bauphase werden stets weitere Cyber-Physische Systeme eingebaut resp. eingesetzt, die sowohl die Informationserfassung des physischen Teils des Digitalen Zwillings erweitern, jedoch auch die Steuerbarkeit des Bauwerks aus Ergebnissen von automatischen Analysen erhöhen. Zum Übergang in die Betriebsphase liegt infolgedessen ein Bauwerk vor, bei dem ein Großteil an CPS eingebaut ist, sodass die Steuerung resp. die Verwendung des Bauwerks effizient und nachhaltig erfolgen kann.

6.2. Der aktuelle Stand der Technik

Um nur geringe Teile eines solchen idealen Falls der Methode der Digital Twin Construction zu etablieren und umzusetzen, sind noch weitere Forschungsarbeiten zu leisten und Entwicklungsaufgaben abzuschließen. Zum aktuellen Zeitpunkt kann in Verbindung des aktuellen Stands der Technik infolgedessen noch kein durchgehender Prozess etabliert werden, der folglich in einer Fallstudie untersucht werden könnte. Es besteht bis dato keine Möglichkeit die Interpretation multipler Datenströme und die daraus resultierende Ableitung von Statusinformationen automatisiert aufzubereiten und für Menschen visuell darzustellen. Ohne eine etablierte Norm oder eine industrieübergreifende Definition der Terme Digitaler Zwilling, Digitaler Schatten oder Digital Twin Construction im Allgemeinen kann keine Interaktionen zwischen den besagten Digitalen Zwillingen von Bauwerken innerhalb eines Projekts oder gar Digitalen Zwillingen unterschiedlicher Projekte erfolgen. Es fehlt die Grundlage für solche Systeme auf technologischer oder sozio-technischer Ebene. Die Anwendbarkeit von Analysen auf Basis maschinellen Lernens oder anderer Aspekte der Künstlichen Intelligenz für diese datenzentrierten Form des Baumanagements benötigt somit noch weiterer Betrachtung und ebenso Entwicklung.³¹¹

Aus den genannten Gründen erfolgt eine Verifizierung in einem umfangreichen System, jedoch in einem geringeren Umfang. Um folglich eine Umsetzung für die Güteprüfung der vorliegenden Arbeit zu ermöglichen, werden nachfolgende Festlegungen getroffen. Es werden durch Betrachtung des entwickelten prototypischen Projektverlaufes die unter 6.1 beschriebenen verknüpften Prozesse, basierend auf den in Kapitel 5.3 dargestellten Funktionsstufen umgesetzt und die Resultate untersucht. So werden Ergebnisse zu einer generellen Machbarkeit erfahren und es werden Rückschlüsse auf anzupassende Prozesse innerhalb der Planung oder Ausführung des bauausführenden Unternehmens gezogen. Alle betrachteten Prozesse beruhen auf demjenigen Stand der Technik, der im betrachteten Unternehmen zum aktuellen Zeitpunkt bei der Projektarbeit eingesetzt wird. Dieser Umstand ist deshalb hervorzuheben, da eine praxisnahe Rückmeldung erforderlich ist, um den Anforderungen der Wissenschaftlichkeit in den Baubetriebswissenschaften gemäß Kapitel 1.4 zu genügen.

Für die Durchführung der Fallstudie im Sinne des Realisierbarkeitstests ist zu Beginn derjenige Grad der Funktionsstufen zu bestimmen, der in der jeweiligen Fallstudie vorliegt (vgl. Abbildung 5-5). Gemäß dieses Funktionsumfangs liegt in Funktionsstufe 1 der virtuelle Teil des Modells so lange in Form eines BIM vor, bis die Verwendung der Modelldaten über die Möglichkeiten einer CDE hinaus geht und eine DTC-Plattform als Grundlage genutzt wird. Dies ist gemäß Kapitel 5.3 so lange nicht der Fall, solange noch kein physisches Modell vorhanden ist und keine manuelle oder automatische Datenübertragung erfolgen kann. In der vorliegenden Fallstudie bestehen sowohl ein virtuelles als auch ein physisches Modell, welche größtenteils durch manuelle, jedoch teils ebenso durch automatisierte Datenübertragung verbunden sind. Infolgedessen kann das vorliegende System definitorisch nicht eindeutig dem Digitalen Modell oder dem Digitalen Schatten zugeordnet werden. Ein Digitaler Zwilling liegt jedoch in keinem Fall vor, da keine bidirektional automatische Verbindung zwischen dem physischen und dem virtuellen Teil

³¹¹ Vgl. Sacks, et al. 2020a, S. 21.

des Bauwerks hergestellt werden kann. Da in einigen Prozessen indes ein hoher Automatisierungsgrad erreicht wird, folglich eine automatisierte Übertragung möglich ist und dies somit den definierten Funktionsumfang von Digitalen Modellen überschreitet, wird das System an dieser Stelle dem Digitalen Schatten zugeordnet. Es sei angemerkt, dass nach Kenntnis des Verfassers ein Digitaler Schatten in vollem Umfang in der Praxis noch nicht umgesetzt werden konnte. In der vorliegenden Arbeit wird eine Approximation des DS erreicht. In dieser Konsequenz erfolgt die Verwendung der Methode der Digital-Twin Construction in Funktionsstufe 2 auf Basis eines Digitalen Schattens innerhalb der Fallstudie. Es sei darüber hinaus angemerkt, in dem Terminus *Digitaler Schatten* sind das virtuelle Abbild des Bauwerks auf Basis der zentralen Koordinationssoftware sowie aller weiteren verwendeten additiven Softwarelösungen inbegriffen, die durch einen automatischen Prozess an diese zentrale Softwarelösungen angebunden sind. Abbildung 6-1 beschreibt diesbezüglich die Verwendung voneinander abgekoppelter Systeme, die jedoch auf demselben System resp. innerhalb derselben zentralen Koordinationssoftware laufen. Die additiven Softwarelösungen liegen innerhalb des Digitalen Schattens vor und sind automatisch bidirektional miteinander verbunden. Die Verbindung der übrigen Systeme zueinander erfolgt mittels In- und Output-Routinen³¹².

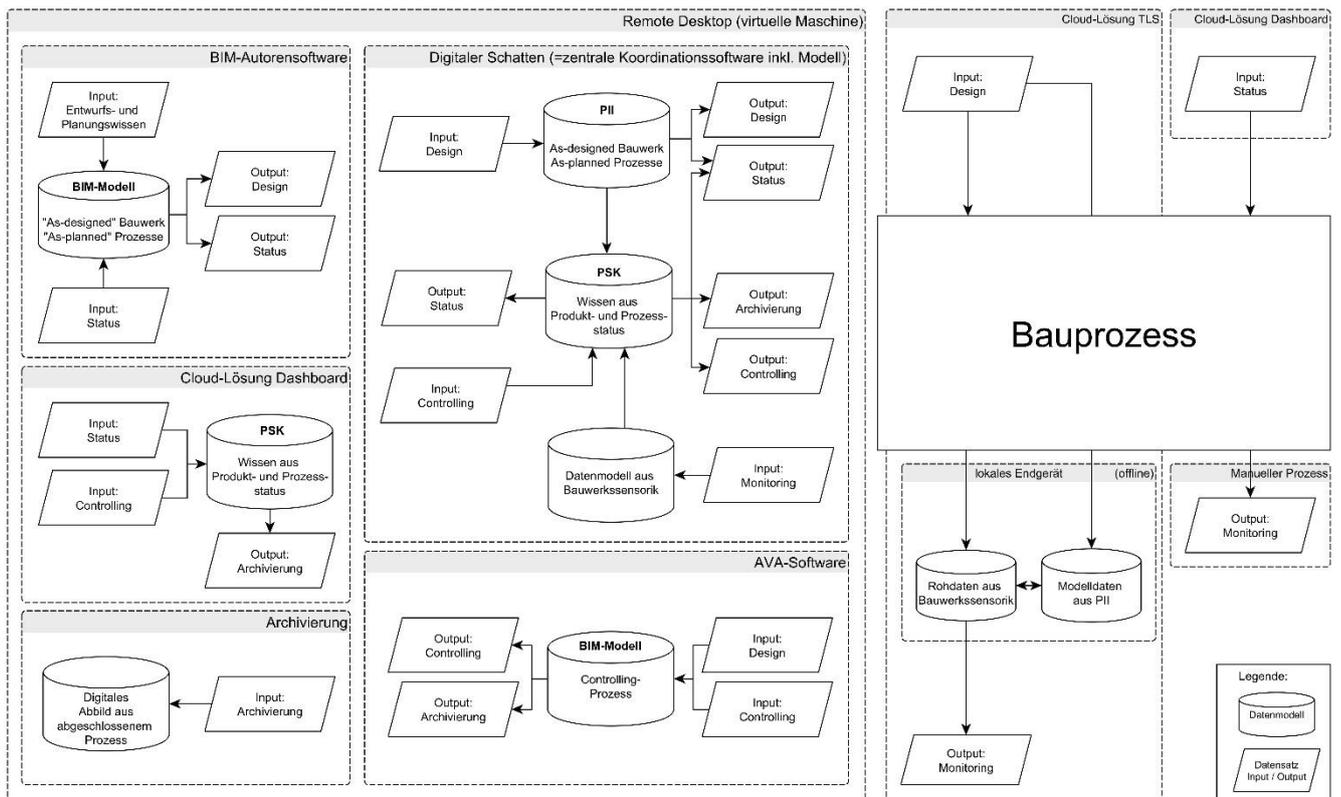


Abbildung 6-1: Übersicht der Datenmodelle mit Input und Output im Realisierbarkeitstest³¹³

³¹² Eine Routine ist vor dem Hintergrund der Informatik eine Abfolge von Prozessen zur Ausführung von Aufgaben innerhalb einer Computerumgebung

³¹³ Eigene Darstellung

Gemäß Funktionsstufe 2 ist die Verwendung einer Cloud-Plattform als Grundlage für den Digitalen Schatten vorgesehen. Die vorab beschriebene zentrale Software kann jedoch zum aktuellen Zeitpunkt auf Basis des vorherrschenden Stands der Technik die Funktionalitäten einer Cloud-Plattform wie sie im Sinne der dieser Arbeit zugrundeliegenden Digital Twin Construction definiert ist, für die Fallstudie nicht leisten. Diesbezüglich wird ein sog. *Remote Desktop*, nachfolgend auch *virtuelle Umgebung* genannt, als diejenige Grundlage verwendet, die eine dezentrale Speicherung und Verarbeitung ermöglicht. Diese virtuelle Umgebung entspricht dem aktuellen Stand der Technik und wird in laufenden Projekten des Praxispartners eingesetzt, um alle verwendeten modellbasierten Prozesse sowohl bei zentralem sowie dezentralem Einsatz abzubilden. Vereinfacht beschrieben emuliert³¹⁴ diese Umgebungen einen konventionellen Desktop-PC inklusive eines gängigen Betriebssystems innerhalb einer Datenzentrale, sodass Anwender und Anwenderinnen unabhängig ihres Standortes darauf zugreifen können. Die Verwendung der jeweiligen Software aller nachfolgend beschriebenen Prozesse wird im Zuge der Fallstudie auf diesem System umgesetzt. Dabei werden Automatismen verwendet, die vom Verfasser der Arbeit mit Unterstützung von Kolleginnen und Kollegen³¹⁵ generiert und projektbezogen umgesetzt wurden. Es sei angemerkt, die konkreten Einstellungen der virtuellen Umgebung und deren Automatisierung sowie ein Großteil der in anderer Software generierten Automatismen tragen nicht maßgebend zum Verständnis dieser Arbeit bei. Daher werden sie nachfolgend nicht beschrieben.

Der Design-Prozess resp. der Prozess des Bauwerksentwurfs sowie der Prozessplanung sind nicht Teil des Digitalen Schattens. Sie erfolgen manuell innerhalb einer BIM-Autorensoftware. Das generierte Modell wird zur Verwendung auf die zentrale Koordinationssoftware exportiert, die während der gesamten Design-Phase die Aufgaben der Common Data Environment übernimmt.

In der Fallstudie ist eine Erfassung von Monitoringdaten über CPS nicht äquivalent zu der Umsetzung gemäß der Definition möglich. Es werden einzelne Abstufungen gemacht, die dennoch eine teilautomatisierte Erfassung und eine größtenteils automatisierte Interpretation sowie Verarbeitung ermöglichen. Darüber hinaus ist eine Betrachtung aller im Bauprozess durchgeführten Arbeiten weder möglich noch sinnvoll. In der Fallstudie wird ein Prozess anhand ausgewählter Bauteile betrachtet, für den sich innerhalb des Projekts der Fallstudie aus baubetrieblichen Gründen entschieden wurde. Das zugrundeliegende Softwaresystem ist proprietär und besitzt die Funktionalitäten einer Cloud-Lösung unabhängig zum Digitalen Schatten. Im Verlauf des Realisierbarkeitstests wird detaillierter darauf eingegangen. Die Interpretation der Monitoringdaten erfolgt wiederum auf dem System der virtuellen Umgebung innerhalb der zentralen Koordinationssoftware.

³¹⁴ Bei einer Emulation wird die Funktionsweise eines Computers auf einem anderen nachgebildet, um dort gewünschten Prozesse auszuführen zu können

³¹⁵ An dieser Stelle sei besonders den folgenden Unterstützern gedankt: Florian Ewert, Mariel Rivero Dapena, Martin Madla, Cenk Celayir, Stylianos Chalkidis, Robin Boos, Boban Sanjic

Die Ergebnisse des Bauwerksmonitorings werden wiederum in den Softwarebereich einer *Ausschreibung, Vergabe und Abrechnungs-Software* (AVA) übertragen. An dieser Stelle sei angemerkt, dass es nicht möglich ist, eine umfangreiche Betrachtung aller Systeme durchzuführen, die aktuell auf dem Markt verfügbar oder in den unterschiedlichen Softwarehäusern in der Entwicklung sind. Daher werden Prozesse resp. Automatisierungsschritte in denjenigen Softwaresystemen entwickelt und umgesetzt, die beim Praxispartner dieser Arbeit bis dato produktiv oder testweise eingesetzt werden.

Die in den AVA-Prozessen verwendete Software ist nicht Teil des Digitalen Schattens (vgl. Abbildung 6-1). Es fehlt eine automatische Anbindung an die zentrale Koordinationssoftware. Der Austausch erfolgt durch In- und Export auf Basis einer manuellen Durchführung zu diskreten, selbst gewählten Zeitpunkten.

Im Zuge der Fallstudie ist es nicht möglich alle Bereiche des Projekt-Controllings innerhalb der Arbeitskalkulation auf Basis der AVA-Software zu betrachten. Die Betrachtung aller im Bauprojekt-Controlling durchgeführten Prozesse würde den Rahmen dieser Arbeit übersteigen. Unter Berücksichtigung des in Kapitel 6.1 dargestellten Untersuchungsgegenstandes werden innerhalb des Gefüges des Bauprojekt-Controllings ausgewählte Prozesse betrachtet. Dazu zählen die Generierung der Leistungs- und der Rechnungsmengen als repräsentativer Prozess für eine Dispositionssteuerung und je nach Häufigkeit und der Geschwindigkeit der Informationsaktualisierung in Teilen ebenso der Durchführungssteuerung. In der Fallstudie wird hingegen nicht die Erfassung der Ist-Kosten betrachtet. Dies liegt einerseits an deren aktuell durchgeführten manuellen Erfassung in der Fallstudie. Andererseits werden in der Fallstudie vornehmlich Informationen aus der Durchführungssteuerung verwendet, um eine Steuerung oder Regelung in Echtzeit zu prüfen.

Eine Übertragung der Ergebnisse aus dem Design-Prozess sowie dem Bauwerksmonitoring in eine visuelle Komponente, die die Bau- resp. die Projektleitung in der Steuerung des Bauvorhabens unterstützen und somit die Entscheidungsfindung erleichtern soll, wird auf Basis der Modellinformationen innerhalb einer grafischen Benutzungsoberfläche durchgeführt. Diese Anbindung erfolgt zwar einmalig als Export. Jedoch gilt dies laut Definition nicht im Sinne einer automatischen Anbindung und somit nicht als Teil des Digitalen Schattens. Wie in Abbildung 6-1 dargestellt, ist somit der Bereich der *Cloud-Lösung Dashboard* nicht als Teil des DS zu sehen. Äquivalent verhält es sich mit dem Bereich der Archivierung. Dort erfolgt der Input nicht durch eine automatische Datenanbindung, sondern ebenfalls mittels Importfunktion.

In der vorliegenden Fallstudie wird dieser Prozess einzig am Ende des jeweiligen Projektes ausgeführt. Aufgrund der langen Laufzeit des Projektes wird zur Nachweisbarkeit der Realisierung lediglich der aktuelle Stand der Modelldaten in Form eines Digitalen Abbildes in die Archivierung übertragen.

6.3. Prüfziele

In der Baubetriebswissenschaft als Form der Realwissenschaften werden nach GIRMSCHIED ausschließlich diejenigen Ziele verfolgt, die praktischen Nutzen haben.³¹⁶ Erkenntnisse werden dabei aus dem Wechselspiel zwischen Theorie und Beobachtung gewonnen, da die jeweils einzelne Betrachtung dieser Aspekte wertlos oder unverständlich sein können.³¹⁷ Vor diesem Hintergrund greift die Problembeschreibung der vorliegenden Arbeit ausgewählte Problemstellungen aus der empirischen Untersuchung der Fokusgruppe und der Expertiseinterviews auf und spiegelt infolgedessen den Stand der Praxis wider. Darauf aufbauend erfolgt die Gestaltung eines theoretischen Konzepts vor dem Hintergrund des aktuellen Stands der Forschung. Ein Nachweis der Realisierbarkeit des Konzepts in realen Projekten belegt somit die innerhalb des Wechselspiels notwendige Umsetzung innerhalb der Praxis und folglich die Anforderung der Wissenschaftlichkeit der Baubetriebswissenschaften.

Der Nachweis der Realisierbarkeit gilt in der vorliegenden Arbeit zu demjenigen Zeitpunkt als erbracht, wenn der in Kapitel 5.4.3 konzipierte Regelkreis (vgl. Abbildung 5-14: RK BPC während der Bauausführung mit Störgrößenaufschaltung) in der Praxis angewendet werden kann. Voraussetzung ist dabei die Prüfung der Anwendbarkeit derjenigen Prozesse, die aus der empirischen Untersuchung hervorgehen. Dies bildet die Grundlage für die Auswahl der Prozesse in Kapitel 6.1.

Die der vorliegenden Arbeit zugrunde liegenden Forschungsfragen gestalten einen hohen Anspruch an Automatisierung, welcher ebenfalls innerhalb der Prüfziele des Realisierbarkeitstests abgebildet werden muss. Diesbezüglich gilt die Bewertung des Automatisierungsgrades der einzelnen Prozesse als adäquates Mittel, um ebendies zu erreichen. Übertragen auf den Grundsatz der Wissenschaftlichkeit innerhalb der Baubetriebswissenschaften entspricht die genannte Prüfung der Anwendbarkeit der Verifikation innerhalb der Wissenschaftsmethodik der Bewertung des Automatisierungsgrades der Validation.

Wenn folglich die Umsetzung der ausgewiesenen Prozesse innerhalb der Fallstudie erfolgreich und der Automatisierungsgrad der Teilaspekte in der entsprechenden Bewertungsskala einen positiven Wert einnimmt, dann sind die Rahmenbedingungen der Verwendbarkeit erfüllt, der praktische Mehrwert wird erzeugt, die Mindestanforderungen des Realisierbarkeitstests werden eingehalten und die Forschungsfragen sind entsprechend beantwortet.

³¹⁶ Vgl. Girmscheid 2007, S. 142.

³¹⁷ Vgl. Girmscheid 2007, S. 158.

6.4. Prüfobjekte, Prüfmerkmale und Prüfmetrik

Das Prüfobjekt der zu überprüfenden Prozesse ist das jeweils zugehörige reale Bauprojekt. Diesbezüglich ergibt sich die Qualität aus dem ermittelten Automatisierungsgrad, welcher wiederum aus dem Zusammenspiel der Merkmale und der Metrik resultiert.

Da der Steuerungskreis des Bauprojekt-Controllings mit Störgrößenaufschaltung (vgl. Abbildung 5-14) durch die Automatisierung der einzelnen Prozessschritte charakterisiert ist, sollen einerseits die Einzelautomatisierungsgrade, darüber hinaus der Gesamtautomatisierungsgrad als Prüfmerkmale dienen. Prüfmetrik ist diesbezüglich die verbal argumentative Zuordnung des Automatisierungsgrades zu den Prüfmerkmalen. Diesem inbegriffen sind die Mindestanforderungen, die durch die attributiven Eigenschaften der Erfüllung (Ja/Nein) festgelegt sind (vgl. Tabelle 1). Der Realisierbarkeitstest ist erfolgreich, sobald alle Prozesse mit Ja attribuiert sind. Der Grad der Automatisierung wird dabei erfasst und die entsprechende Stufe wird dem Prozess als Merkmal zugewiesen. Darüber hinaus wird der Automatisierungsgrad verbal argumentativ in Bezug zu denjenigen Prozessen gewichtet, die in Kapitel 6.1 ausgewählt wurden. Die summierte Gewichtung wird nach Abschluss der Untersuchung den Automatisierungsgrad des Realisierbarkeitstests vor dem Hintergrund der automatischen Verarbeitung einer kontinuierlich aktualisierten Datengrundlage repräsentieren.

Tabelle 1: Prüfmetrik

Stufe	Automatisierungsgrad	Prüfmerkmal	Attributive Eigenschaft [erfüllt]
0	nicht vorhanden	Der Prozess wird ganzheitlich manuell durchgeführt	Nein
1	gering	Der Prozess wird manuell gestartet, einzelne Prozesse werden automatisch durchlaufen, Berichte werden manuell generiert	Ja
2	gering	Der Prozess wird manuell gestartet, einzelne Prozesse werden automatisch durchlaufen, Berichte werden automatisch generiert	Ja
3	mittel	Der Prozess wird manuell gestartet, alle Prozesse werden automatisch durchlaufen, Berichte werden manuell generiert	Ja
4	mittel	Der Prozess wird manuell gestartet, alle Prozesse werden automatisch durchlaufen, Berichte werden automatisch generiert	Ja
5	hoch	Der Prozess startet und läuft vollständig automatisch	Ja

Als Prüfprozesse (PP01 bis PP10) gelten diejenigen Prozesse, die innerhalb des Realisierbarkeitstests umgesetzt und betrachtet werden. Diese repräsentieren die in Kapitel 6.1 aus der Sphäre der Projektbearbeitung eines Bauunternehmens ausgewählten Arbeitsabläufe.

Folgende Prüfprozesse werden im Realisierbarkeitstest betrachtet:

PP01 Vorbereitende Maßnahmen im Controlling-Prozess für die modellbasierte Angebotskalkulation

PP02 Aktualisierung des Digitalen Schattens auf Basis geänderter Planungsstände

- PP03 Vergleich unterschiedlicher Modellstände
- PP04 Modellbasierte Absteckung und Erfassung
- PP05 Baustellenbezogene Prozesse zur Erfassung des Leistungsstandes
- PP06 Abgleich der Monitoringdaten mit dem Planungsstand
- PP07 Einbinden der Leistungs- und Rechnungsübersichten
- PP08 Visuelle Darstellung des Projektstatus mittels grafischer Benutzungsoberfläche
- PP09 Archivierung
- PP10 Resultat: Automatische Verarbeitung auf einer kontinuierlich aktuellen Datengrundlage

6.5. Durchführung des Realisierbarkeitstest

Im weiteren Verlauf werden die Kernthemen des Realisierbarkeitstests zusammengetragen. Zunächst werden die zugehörigen Projekte der Fallstudie sowie die Prozessübersicht im Allgemeinen beschrieben. Dem folgt die Prozessdurchführung der für das Verständnis wichtigsten Aspekte der Prüfprozesse.

6.5.1. Fallstudie

Der Realisierbarkeitstest erfolgt grundlegend in der Umsetzung zweier Projektuntersuchungen und somit anhand zweier Objekte. Aufgrund des Umfangs der vorliegenden Arbeit wird grundsätzlich nur eines der Projekte stellvertretend für einen der Prozessschritte beschrieben. Daher wird der Einfachheit halber nachfolgend lediglich von einer Fallstudie gesprochen. Es wird stets dasjenige Projekt ausgewählt, dessen Durchführung und Auswertung für ein Verstehen der Arbeit nach Ansicht des Verfassers geeignet ist. Dabei werden zwei Projekte unterschiedlicher Komplexität verwendet, um ein größtmögliches Spektrum an Projektarbeit abzudecken, die beim Praxispartner dieser Arbeit im Bereich Ingenieurbau ausgeführt werden. Das erste Projekt hat eine sehr hohe Komplexität und Individualität, das zweite eine sehr geringe Komplexität und eine hohe Wiederholbarkeit.

Das erste der Projekte ist eine Brückensanierung unter fließendem Verkehr in der Stadt Köln. Im Stadtteil Mülheim wird die Rheinbrücke „Mülheimer Brücke“ inklusive angrenzender Rampenbauteile saniert.

Die Brücke überführt die Bundesstraße B51 sowie die Bereiche der Stadtbahn über den Rhein und verbindet die Kölner Stadtteile Mülheim und Riehl. Der gesamte Brückenzug hat eine Länge von ca. 950 m und besteht aus sieben Bauwerken: Die ca. 94 m lange Deichbrücke als vierfeldrige Stahlbrücke mit einem Überbau als Stahlträgerrost, Trennpfeiler inklusive der jeweiligen Treppenanlagen aus Stahlbeton, die Flutbrücke als zweifeldrige Stahlkonstruktion mit einer Länge von ca. 116 m, die links- bzw. rechtsrheinischen Ankerpfeiler als Endauflager der Strombrücke zur Aufnahme der Verankerungskräfte aus den Tragkabeln, die Strombrücke als Hängebrücke mit Längs-, Quer-, und Lastverteilungsträgern aus Stahl mit zwei parallelen Tragkabeln über den Rhein und einer Länge von ca. 485 m und zuletzt die Rechtsrheinische Rampe als 248 m langes Rahmentragwerk mit drei Überführungsbauwerken in Stahlbetonbauweise sowie einem daran anschließenden Stützbauwerk mit einer Länge von 127 m. Die beschriebenen Bauwerke weisen im Hinblick auf den Straßenquerschnitt im Wesentlichen eine gleichartige Aufteilung auf, unterscheiden sich hinsichtlich der Konstruktion jedoch deutlich voneinander. Der Erstbau der Mülheimer Brücke erfolgte in den Jahren 1927-1929. Bei Bauwerksprüfungen in den Jahren 2012 wurden zahlreiche Schäden an den Brückenbauwerken festgestellt, woraufhin die vorliegende Instandsetzung bzw. Ertüchtigung des Brückenzuges geplant wurde.³¹⁸

³¹⁸ Vgl. Stadt Köln.

Das Projektvolumen betrug bei Auftragseingang 115 Mio. € und hat sich im Laufe der letzten Jahre erhöht. Grund dafür ist unter anderem die vorab unterschätzte Komplexität dieses Brückenbauwerks sowie der Rampenbauwerke. Ein Teil des Bauumfangs ist der Ersatzneubau des rechtsrheinischen Rampenbauwerks. Dieser bildet den Umfang der Fallstudie. Im Ersatzneubau eingeschlossen ist die Sanierung der östlich anschließenden Stützwandbereiche. Sämtliche Tiefgründungen werden entweder durch Mikropfähle oder durch Großbohrpfähle ausgeführt. Während der Sanierung wird das Bauwerk längs durch einen Trennschnitt in drei Teile geteilt, welche im Nachgang zu unterschiedlichen Zeiten saniert werden. Dabei kommen unter anderem die später verwendeten temporären Aussteifungselemente zum Einsatz, die nach einem Trennschnitt die Horizontallasten aus dem laufenden Verkehr in den Untergrund ableiten werden.

Das zweite ausgewählte Projekt ist die Planung und der Neubau einer Lärmschutzwand an einer Bahnstrecke im Bereich Flörsheim am Main. Dieses erfolgt im Zuge des Konjunkturpakets II „Lärmsanierung an Schienenwegen des Bundes“. Die Baumaßnahme umfasst die Herstellung von sechs Lärmschutzwänden mit einer Höhe von 3,00 m über Schienenoberkante und einer Gesamtlänge von 3,7 km. Entlang der Lärmschutzwände werden im Bereich von Bestandsbauwerken neun Sonderbauwerke hergestellt. Es erfolgen darüber hinaus diverse Gründungen mittels Einzel- und Streifenfundamenten. Eine besondere Herausforderung stellt eine dreiwöchige Vollsperrung dar, innerhalb der fünf der sechs Wände vollständig fertig gestellt werden müssen. Die Abwicklung in einer solch kurzen Zeitspanne erfordert präzise Arbeitsvorbereitung und bietet dem vorliegenden Forschungsprojekt somit sinnvolle Rahmenbedingungen. Die Komplexität von Projekten mit Lärmschutzelementen ist im Allgemeinen gering und durch die modulare Bauweise wird das Optimierungspotenzial bezogen auf die Planung und Ausführung als sehr hoch angesehen.

6.5.2. Übersicht

Die Prüfprozesse folgen einem zusammenhängenden Gesamtprozessverlauf, der unmittelbar die Realität der Projektbearbeitung beim Praxispartner dieser Arbeit widerspiegelt. Wie bereits angeführt, wird dabei nicht die Gesamtheit der Prozesse innerhalb des Realisierbarkeitstests durchlaufen, sondern lediglich die nach Kapitel 6.1 repräsentativen. Von diesen Prozessen werden wiederum einzelne innerhalb der jeweiligen Softwarelösung manuell durchgeführt. Diese Einschränkung liegt häufig darin, dass entsprechende übergeordnete Prozessketten nicht direkt miteinander verknüpft sind. Teils werden gewünschten Prozesse nacheinander manuell gestartet, teils wird dies durch eine Automatisierung erreicht.

In der jeweiligen Prozessübersicht werden viele Prozesse als automatisch dargestellt, ihre Aneinanderreihung ist allerdings manuell zu starten. An denjenigen Stellen, an denen die manuelle Aneinanderreihung durch automatisierte Prozesse erweitert wird, wird eine Erläuterung vorangeführt.

Da das Vorgehen während der Durchführung des Realisierbarkeitstests näher erläutert wird, wird an dieser Stelle nur eine kurze Übersicht gegeben. Es wird darauf hingewiesen, dass grundlegend für alle nachfolgenden Abbildung dieses Kapitels die Legende aus Abbildung 6-2 gilt.

Grundlegend erfolgt der Realisierbarkeitstest auf Basis des Remote Desktops. Auf diesem virtuellen Computer wird einerseits in einer frühen Projektphase die BIM-Autorensoftware und im Anschluss der Digitale Schatten als zentrale Koordinationssoftware inkl. der Modelldaten verwendet. Im frühen Planungsprozess wird auf Basis der BIM-Autorensoftware die Bauwerksmodellierung im Zuge des Bauwerksentwurfs sowie der Prozessplanung erstellt. Das Modell trägt somit die „as-designed“-Informationen des Bauwerks sowie die „as-planned“-Informationen der Prozesse. Nach dem Übergang in den Digitalen Schatten entsprechen diese Informationen den Zuständen des *Project Intend Information* sowie dem *Project Status Knowledge*. Aufgrund der fehlenden bidirektional automatisierten Verbindung zwischen virtuellem und realem Bauwerk, liegen sowohl dem Bereich des Inputs ebenso wie dem Bereich des Outputs Import- und Exportvorgänge zugrunde.

Bei Übertragung der Informationen auf die Baustelle wird eine proprietäre Cloud-Lösung des Herstellers des Terrestrischen Laserscanners verwendet. Die Erfassung der Monitoring-Informationen auf der Baustelle erfolgt teilautomatisiert durch den entsprechenden Laserscanner. Die Daten werden prozessiert und stehen folglich für eine Übertragung aus der Cloud-Lösung bereit. Diese Übertragung wird ebenfalls manuell durchgeführt.

Die Daten aus dem Bauwerksmonitoring werden in den Digitalen Schatten übertragen und dort prozessiert. Entsprechend des benötigten Anwendungsfalls werden die Daten einerseits in das BIM-Modell innerhalb der AVA-Software überspielt, andererseits in das Dashboard übertragen, um der Projektsteuerung dienlich zu sein. Aus diesem werden Informationen auf der Baustelle durch die Bau- oder Projektleitung manuell abgegriffen und in die Bauphase überführt. Dies erfolgt ausschließlich manuell, da eine Interpretation der jeweiligen Bau- oder Projektleitung notwendig ist.

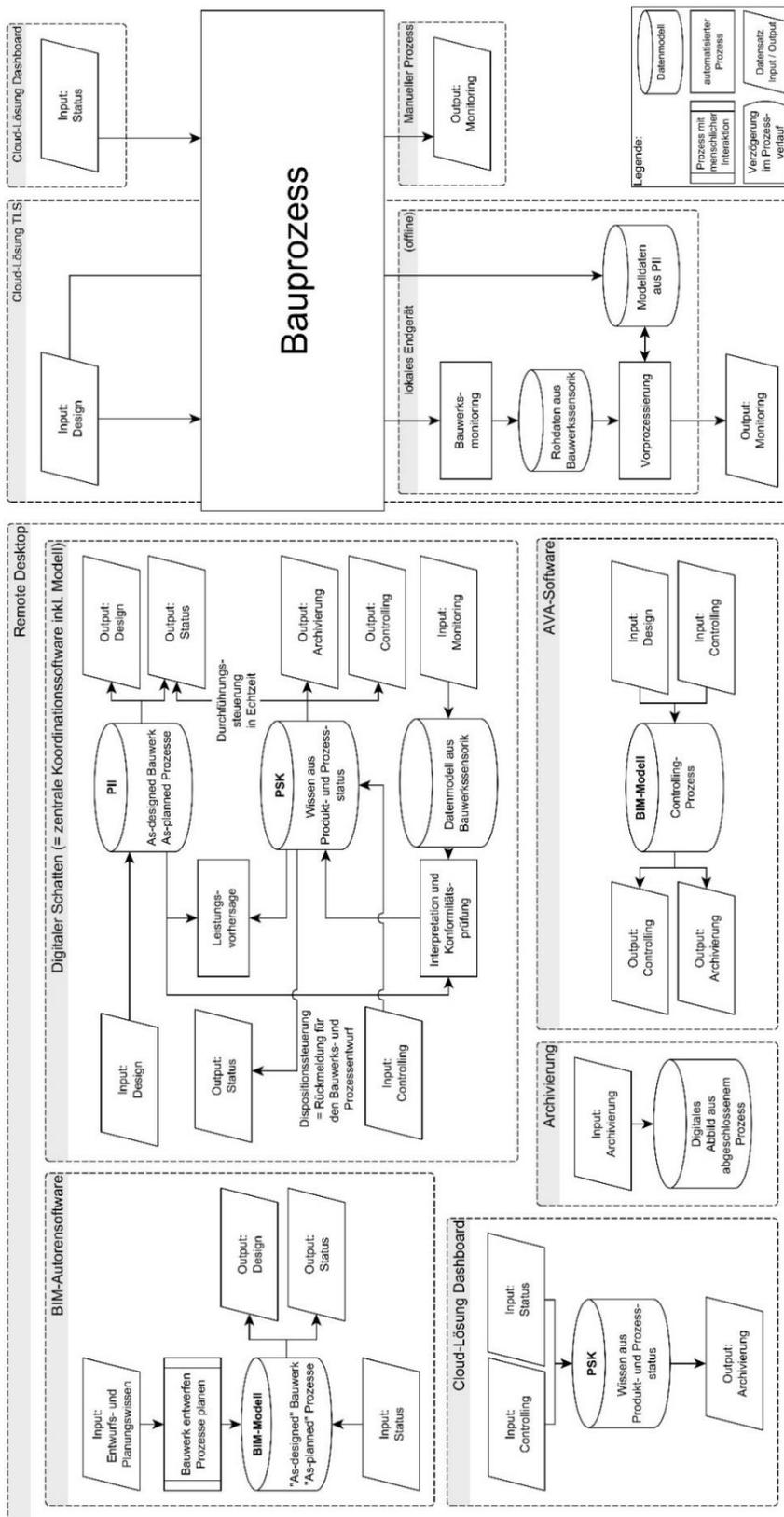


Abbildung 6-2: DTC im Realisierbarkeitstest³¹⁹

³¹⁹ Eigene Darstellung

6.5.3. Durchführung

Der Übersichtlichkeit halber wird die Durchführung des Realisierbarkeitstests in einzelne Prozesse unterteilt und entsprechend beschrieben.

Designprozess

Der Projektprozess im Allgemeinen beginnt mit der Planungs- resp. der Designphase. Diesbezüglich erfolgen der Design-Prozess resp. die Prozesse des Bauwerksentwurfs sowie der Prozessplanung manuell in einer BIM-Autorensoftware gemäß Abbildung 6-3. Je nach Anforderungen während der Planung sowie nach Nachträgen während der Bauausführung wird der Design-Prozess und dadurch die Modellanpassung mehrfach resp. zyklisch durchlaufen. Am Ende des Design-Prozesses steht der Export der Modellinformationen zur Verwendung innerhalb einer zentralen Koordinationssoftware, die die Aufgaben der Common Data Environment übernimmt. Der Vollständigkeit halber sei angemerkt, dass in diesem Fall kein Datenexport im konventionellen Sinne vorliegt. Es wird zwar aus dem ursprünglich proprietären ein abweichendes Format exportiert, dieses beinhaltet jedoch lediglich eine Referenz auf das aktuelle Modell im Format der Autorensoftware. Dieser Prozess ist für die nachfolgende Verwendung von hoher Bedeutung, da hierdurch eine Automation ermöglicht wird, die eine kontinuierliche Überprüfung der Design-Daten gewährleistet. Im Prozess *Modellaktualisierung* wird detaillierter darauf eingegangen.

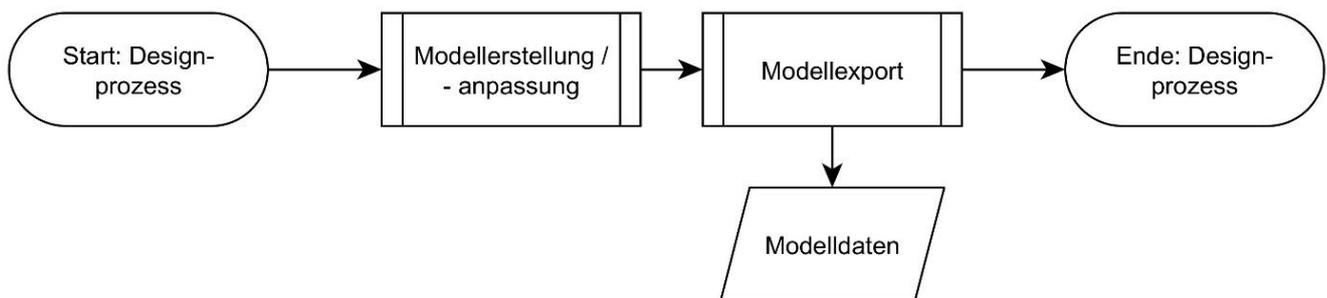


Abbildung 6-3: Design-Prozess³²⁰

Bauablaufplanung

Parallel zur Modellgenerierung und infolgedessen ebenfalls in den Design-Prozess eingebunden, ist die Generierung eines Terminplans resp. eines Bauablaufplanes. Je nach Phase, in der sich das Projekt befindet, wird entweder das erstere oder das letztere erstellt. Ein Terminplan stellt die auftraggeberseitige Planung der zeitlichen Entwicklung des Bauprojektes dar und enthält alle relevanten Vorgänge für die Prozesse der Planung und der Ausführung. Der Bauablaufplan

³²⁰ Eigene Darstellung

stellt wiederum die Präzisierung und Umsetzung des Bauzeitenplans als Element des Bauvertrages in die operative Sphäre durch den Auftragnehmer (AN) dar und im Rahmen der Dispositionsfreiheit unter Beachtung aller vertraglichen Vorgaben.³²¹

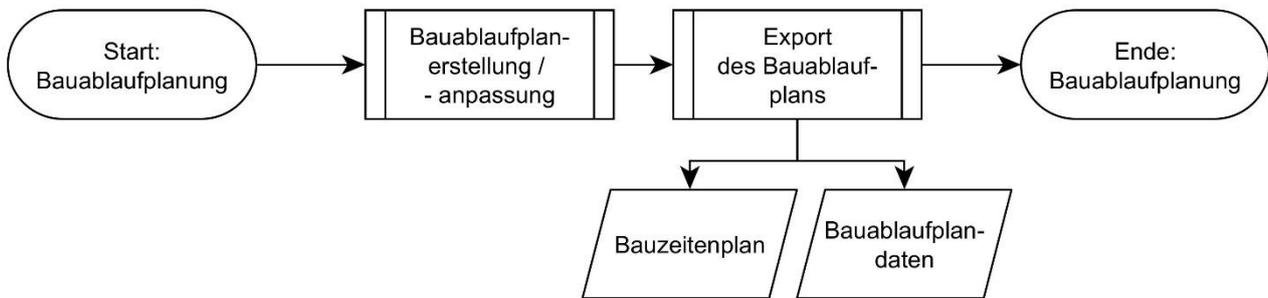


Abbildung 6-4: Prozess: Bauablaufplanung³²²

Wie bereits in der Zielstellung in Kapitel 1.2 beschrieben, wird in der vorliegenden Arbeit die operative Sphäre eines Bauunternehmens betrachtet. Daher wird im Folgenden der Terminus *Bauablaufplan* verwendet. Diesbezüglich sieht die Prozessgestaltung nach Abbildung 6-4 den Arbeitsschritt der Erstellung oder je nach Fortschritt des Projektes auch die Anpassung des Bauablaufplanes vor. Im Anschluss daran erfolgt der Export dieses Planes. Für die Weiterverwendung im Controlling-Prozess oder in der zentralen Koordinationssoftware wird ein entsprechendes proprietäres Format verwendet.

Vorbereitende Maßnahmen

Gemäß der Betrachtung der operativen Sphäre wird die modellbasierte Angebotsbearbeitung in der vorliegenden Arbeit als dem Design-Prozess zugehörig, jedoch als nachgelagert betrachtet. Hingegen ist dieser Prozess im Sinne der *Digital Twin Construction* als ein für die Bauphase vorbereitender Prozess anzusehen, in dem diejenige Verbindung der Modelldaten mit den Controlling-Prozessen hergestellt wird, welche im Laufe der Projektausführung automatisiert ablaufen werden. Diese vorbereitenden Maßnahmen legen ebenfalls die Grundlage für die modellbasierte Angebotskalkulation und deren anschließende Überführung in die Auftrags- resp. Arbeitskalkulation. Entsprechend Abbildung 6-2 wird der Bereich des Controlling-Prozesses auf Basis der AVA-Software aufgrund der manuellen Datenübertragung nicht in den Digitalen Schatten einbezogen. Der Prozess startet gemäß Abbildung 6-5 durch das Generieren des Projektes mit allen zugehörigen Projektinformationen in der entsprechenden Software auf Basis der virtuellen Umgebung.

³²¹ Gemäß Institut für Baubetrieb, Technische Universität Darmstadt

³²² Eigene Darstellung

Die in der Fallstudie untersuchten Projekte repräsentieren die Projektbearbeitung als Auftragnehmer für einen öffentlichen Bauherrn. Das bedeutet für die betrachteten Projekte die notwendige Einbindung des Leistungsverzeichnisses (LV) des AG. Dieses wird in der Controlling-Software mit den Modelldaten verbunden, indem über eine entsprechende Schnittstelle eine dynamische Verbindung hergestellt wird. So erfolgt die Verknüpfung mittels dedizierter Merkmale, die für bestimmte Elemente der Bauwerksinformationsmodelle gelten und auch bei einer Überarbeitung des Modelldesigns nicht geändert werden. Hingegen werden hinzugefügte oder entfallene Modellelemente aus der Zuweisung ebenfalls verknüpft oder entfernt.

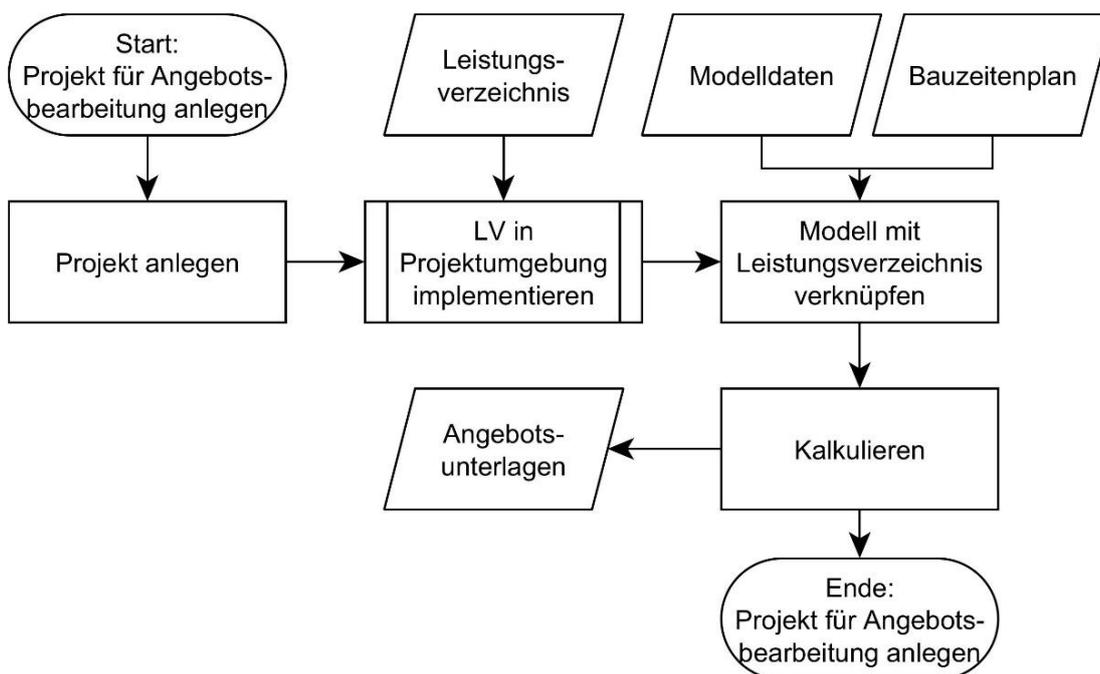


Abbildung 6-5: Prozess: Vorbereitende Maßnahmen für die modellbasierte Angebotskalkulation³²³

Die Zuweisung der Modellelemente zum Leistungsverzeichnis birgt in der Fallstudie einzelne Problemstellungen. Nicht sämtliche Modellelemente können den notwendigen Positionen des Leistungsverzeichnisses zugeordnet werden. Das liegt einerseits an der grundlegenden Systematik der verwendeten Software. Diese beschränkt die Zuweisung von Elementen zu sog. Unterpositionen des Leistungsverzeichnisses. Dadurch wird vorausgesetzt, dass die Elemente auf den sog. Hauptpositionen zugewiesen werden. Eine aus diesem Prozess resultierende Meldung oder Abrechnung von Leistungen führt zu der Notwendigkeit alle in der jeweiligen Position enthaltenen Elemente gleichermaßen zu melden oder abzurechnen. Beispielhaft kann die Position *Baustelleneinrichtung vorhalten* verwendet werden. Alle dort eingebundenen Modellelemente werden bspw. in demselben prozentualen Fertigstellungsgrad angegeben. Dies erfolgt

³²³ Eigene Darstellung

ebenfalls dann, wenn einzelne Elemente zu einem späteren Zeitpunkt erst angeliefert und aufgestellt werden. Sie werden diesbezüglich teils zu früh gemeldet oder abgerechnet.

Die zweite betrachtete Problemstellung ist der generelle Aufbau der Leistungsverzeichnisse, die in den Projekten der Fallstudie von den jeweiligen Auftraggebern zur Verfügung gestellt wurden und somit zwingend innerhalb des Projektes einzuhalten waren. Der Aufbau verhindert eine ganzheitliche modellbasierte Bearbeitung des Projektes, da nicht jede Position so konstelligiert ist, dass eine Zuweisung von Modellelementen ermöglicht wird. Problemstellungen treten dann auf, wenn Pauschalen für Elemente oder gar immaterielle Leistungen abgefordert werden.

In der durchgeführten Fallstudie konnten aus diesen Gründen nicht sämtliche Elemente des Projektes im Sinne der Forschungsarbeit umgesetzt werden. Unter Betrachtung der Forschungsfrage führt dieser Fall allerdings nicht zu einem Abbruch der Untersuchung, da für die Betrachtung des Prozesses des Bauprojekt-Controllings eine hohe Anzahl an Elementen zu entsprechenden Positionen auf der korrekten Positionsebene zugeordnet werden konnten. Diejenigen Elemente des Modells sowie diejenigen Informationen des Bauzeitenplans, bei denen eine Zuweisung möglich ist, werden folglich dem Leistungsverzeichnis zugeordnet und es werden daran die zugehörigen Mengen der Modellinformationen errechnet. An dieser Stelle wird nicht näher auf diesen Prozess eingegangen. Für weitere Informationen kann entsprechende Literatur über sog. *QTO-Abfragen* herangezogen werden.

Nach der Generierung der Mengen innerhalb des Leistungsverzeichnisses erfolgt auf deren Basis die Kalkulation durch die jeweiligen Expertinnen und Experten. Je nach Projektkomplexität fällt der Arbeitsumfang größer oder geringer aus. Aus der Kalkulation werden entsprechende Unterlagen für die Submission zusammengestellt, exportiert und an den Bauherrn gesendet. Nach Auftragseingang wird das Angebotsprojekt in den Status eines Auftragsprojektes und dadurch ebenso die Angebots- in die Auftragskalkulation überführt.

Eine wichtige Komponente der betrachteten Fallstudie ist die Modellaktualisierung. Dieser Prozess dient im Idealfall der kontinuierlichen Überprüfung der Modelldaten und soll für einen stets aktuellen Datenbestand Sorge tragen. Diesbezüglich kann die zentrale Koordinationssoftware auf Basis einer virtuellen Umgebung die benötigte Kontinuität einer Cloud-Lösung nicht ganzheitlich erreichen, da die verwendeten Hard- und Softwaresysteme einen derartigen Prozess nicht unterstützen. Annäherungsweise kann jedoch eine Quasikontinuität simuliert werden, indem in regelmäßigen diskreten Abständen die virtuelle Umgebung gestartet und alle nachfolgend beschriebenen Prozesse der Modellaktualisierung automatisch durchlaufen werden. Am Ende der Prozesskette wird die virtuelle Umgebung beendet. Vor dem Hintergrund der Fallstudie und der Quasikontinuität erreicht dieser Prozess der Modellaktualisierung einen guten Automatisierungsgrad.

Darüber hinaus gehende resp. anschließende Prozesse benötigen zumindest teilweise manuelle Bedienung. Diesbezüglich wird die virtuelle Umgebung jeweils von den bearbeitenden Personen selbstständig gestartet und nach Abschluss ebenfalls wieder beendet. Die angesprochene Modellaktualisierung erfolgt dennoch bei jedem Programmstart und wird nachfolgend näher erläutert.

Aktualisierung des Digitalen Schattens auf Basis geänderter Planungsstände

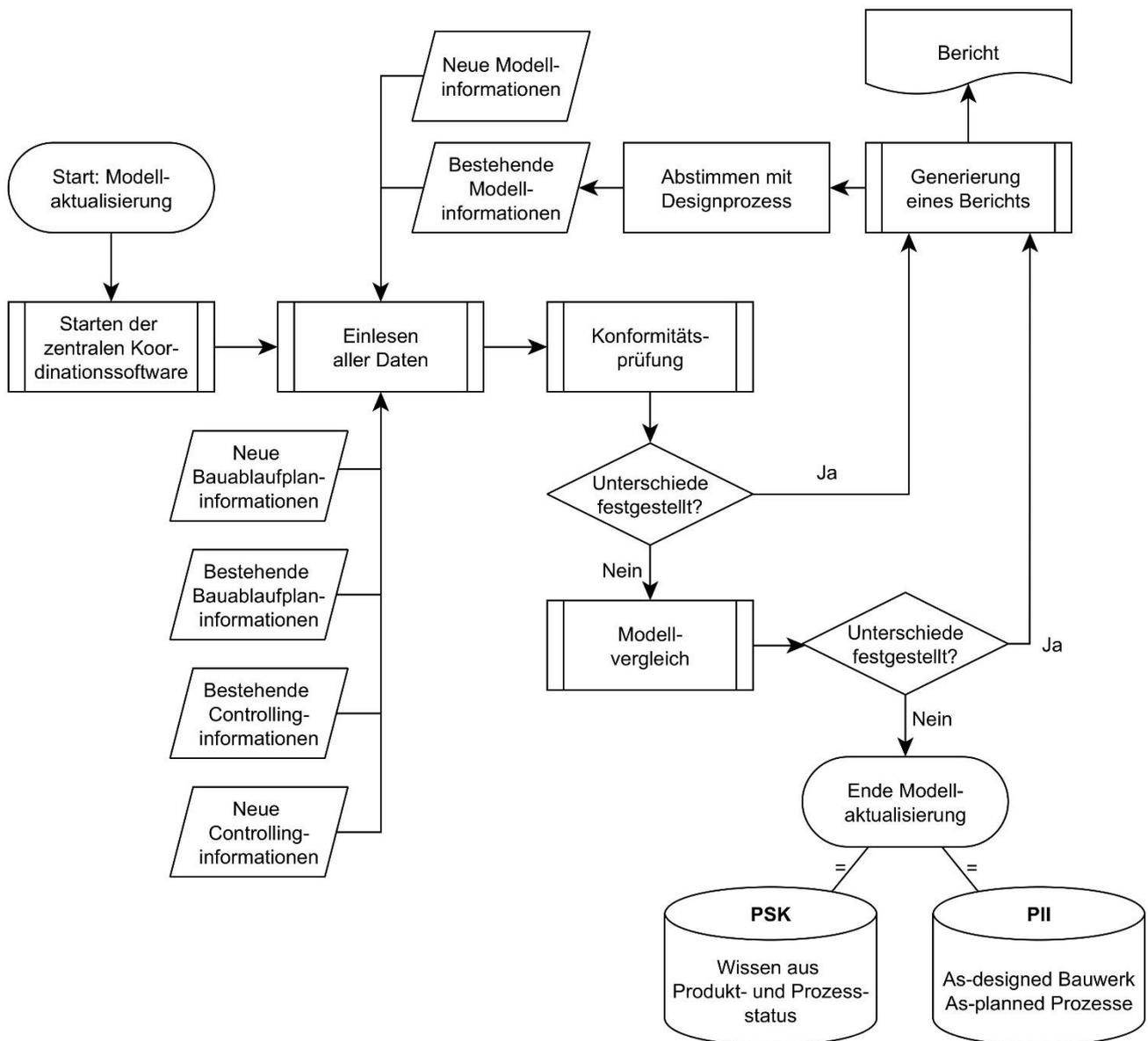
Der Prozess der Modellaktualisierung auf Basis des Digitalen Schattens ist in Abbildung 6-6 dargestellt. Dieser Prozess verläuft automatisch bei jedem Start der zentralen Koordinationssoftware. Nach Programmstart erfolgt die automatische Aktualisierung aller eingebundenen Daten, indem zuerst alle Daten geprüft werden. Hierzu werden die entsprechenden Ordnerpfade nach vorhandenen Daten überprüft und alle dort befindlichen Daten werden eingelesen. Dies betrifft in der vorliegenden Fallstudie Bauwerksmodell-, Bauablaufplan- und Controlling-Daten wie unter anderem Informationen über den aktuellen Bauzustand. Es sei angemerkt, dass eine Verbindung der Modelldaten mit den jeweils einzeln strukturierten Vorgängen innerhalb des Bauablaufplans vorhanden sein muss, sodass eine Verknüpfung von Objekten mit Vorgangsdauern im Sinne eines sog. *4D-Modells* erfolgen kann. Diese Verknüpfung wird zu Projektbeginn einmalig eingestellt, sodass alle weiteren Aktualisierungen der Daten keinen Einfluss auf die Verbindung haben. Eine solche Verknüpfung kann auf unterschiedliche Weisen erfolgen. Weiterführende Informationen können entsprechender Literatur entnommen werden.

In der vorliegenden Fallstudie wird diese Verknüpfung durch eine projektspezifische Abfolge von Zeichen des ASCII-Codes ermöglicht, die aus markanten Unterteilungen des Projektes besteht. Diese Zeichenabfolge wird nach Erfahrung des Autors meist ebenfalls zur Zuweisung von anderen Projektdaten wie bspw. Zeichnungsunterlagen verwendet, sodass diese automatisiert von Ablagesoftware in den Projektverzeichnissen zugeordnet werden kann. Darüber hinaus ist sicherzustellen, dass die Grundlagen einer Bearbeitung mit einem SSoT in Form der Verwendung von GUIDs³²⁴ eingehalten werden.

Für den Prozess des Einlesens aller Dateien kommt das vorab beschriebene Referenzieren auf das aktuelle Bauwerksmodell im Format der Autorensoftware gemäß des Design-Prozesses zum Einsatz. Dabei erfolgt der Export aus der Autorensoftware in einem spezifischen Format, das entsprechende Referenzinformationen beinhaltet. Dadurch wird eine Redundanz in den Modelldaten vermieden, eine kontinuierliche Aktualisierung, ein sog. Update, wird hingegen ermöglicht. Zusammengefasst ermöglicht dieser Aktualisierungsprozess eine automatisierte Einbindung nach Änderungen innerhalb des Designprozesses. Die Verknüpfung der Modellinformationen mit den Informationen aus dem Controlling-Prozess erfolgt äquivalent. Dabei wird in der entsprechenden Verbindung die Verlinkung mittels GUID hergestellt. Das bedeutet, innerhalb des Digitalen Schattens besitzt jedes Element einen eindeutigen Identifikationswert. Dieser wird innerhalb des Controlling-Prozesses dazu verwendet, den entsprechende Status eines jeden Elements innerhalb einer datenbankähnlichen Datei abzurufen. Anhand der Einträge innerhalb der Datenbank und der GUID als sog. *Primary Key*³²⁵ werden die jeweiligen Daten aus der datenbankähnlichen Datei den Elementen innerhalb des Digitalen Schattens automatisiert zugewiesen.

³²⁴ Ein Globally Unique Identifier (GUID) ist eine eindeutige Zahl mit einem Bereich von 2^{128} Werten (ca. $3,4028236e+38$) und kann dadurch zur eindeutigen Identifikation von Informationen in einem Computersystem verwendet werden.

³²⁵ Der *Primary Key* wird in einer Datenbank zur eindeutigen Identifizierung eines Datensatzes genutzt. Der gesamte Inhalt des Datensatzes kann durch eine Verbindung zum *Primary Key* abgerufen werden.

Abbildung 6-6: Prozess: Modellaktualisierung³²⁶

Gemäß den Prozessen der Modellaktualisierung erfolgt nach dem Einlesen die Konformitätsprüfung der Daten. Hierbei werden automatisiert parametrische Bestandteile der eingebundenen Daten miteinander verglichen. In Abbildung 6-6 werden alle eingebundenen Daten bspw. durch *Neue Modell-Daten* und *bestehende Modell-Daten* bezeichnet. In dem Vergleich werden u.a. Parameterschreibweisen oder auch geometrische Eigenschaften verglichen. Dieser Prozess innerhalb der zentralen Koordinationssoftware bildet bei Unterschieden unter anderem sog. *An-sichtspunkte* oder *SearchSets* innerhalb der Software, die später in einem Bericht veröffentlich

³²⁶ Eigene Darstellung

werden. Diese tragen dazu bei, dass die entsprechenden Unstimmigkeiten zügig von den Projektfachleuten gelöst werden können.

Vergleich unterschiedlicher Modellstände

Wird kein Fehler in der Konformitätsprüfung entdeckt, erfolgt der Modellvergleich gemäß Abbildung 6-7. Dabei werden nacheinander erst die geometrischen Daten des Bauwerksmodells verglichen und anschließend die semantischen. Das bedeutet, falls Abweichungen auftreten, können diese einerseits aus Abweichungen der einzelnen Bauteilgröße, -länge, etc. resultieren, andererseits aus Abweichungen innerhalb der Werte derjenigen Attribute, die denselben Attributnamen tragen.

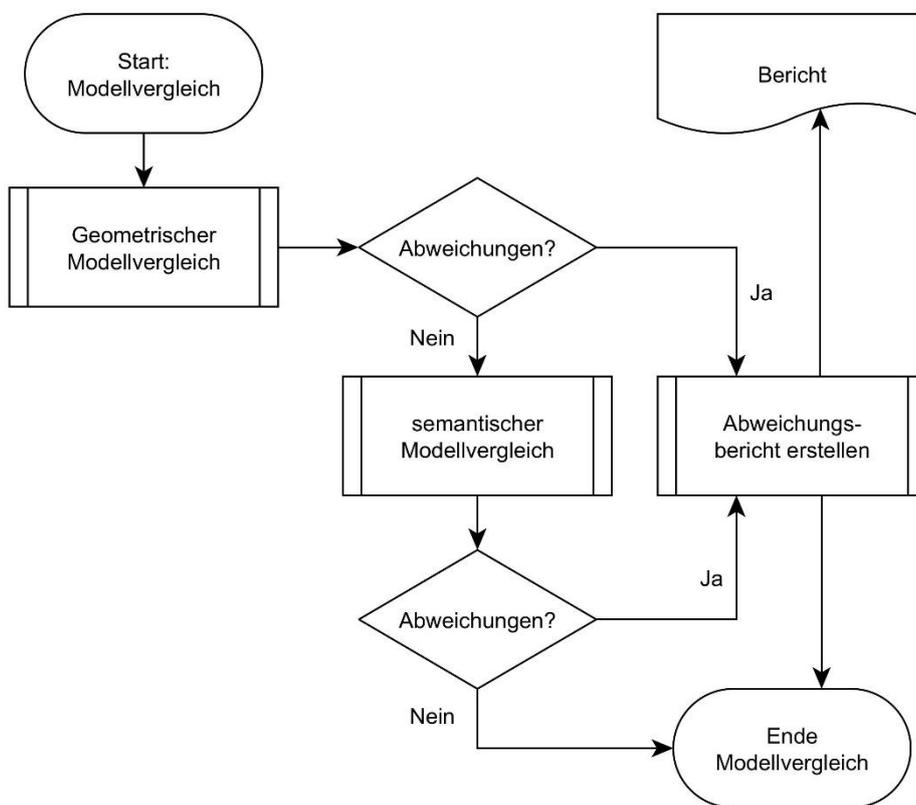


Abbildung 6-7: Prozess: Modellvergleich³²⁷

Ein Beispiel in diesem Zusammenhang könnte eine Abweichung in den Zeiten aus dem Bauablaufplan sein, die den einzelnen Elementen zugeordnet sind. In Abbildung 6-8 ist solch eine semantische Abweichung in den Attributwerten (engl. *property value*) innerhalb der Fallstudie dargestellt, die sich aus einer Verzögerung ergeben haben. Dabei wird automatisiert ein Bericht in Form eines Dokumentes erstellt, der die erkannten Abweichungen visuell darstellt und

³²⁷ Eigene Darstellung

ebenso die Abweichungen beschreibt. Die geometrischen Abweichungen werden an dieser Stelle nicht näher beschrieben. Es wird jedoch automatisch eine farbliche Gestaltung der geometrischen Abweichung vorgenommen (vgl. Abbildung 6-8).

In der Fallstudie der Lärmschutzwände musste aufgrund einer geologischen Änderung das Rammrohr sowie der zugehörige HE-Träger verschoben werden. Es resultierte sowohl eine Verlängerung der Aluminium-Elemente auf der einen und eine Verkürzung der entsprechenden Elemente auf der anderen Seite dieses HE-Trägers. Bei der visuellen Aufbereitung des Modellvergleiches werden unveränderte Elemente in grün und modifizierte Elemente in gelb dargestellt. Für die Fälle von entfernten oder nicht zuweisbaren Elementen können entsprechend andere Farben gewählt werden. Grundlage des jeweiligen Elementvergleiches ist die vorab eingeführte GUID.

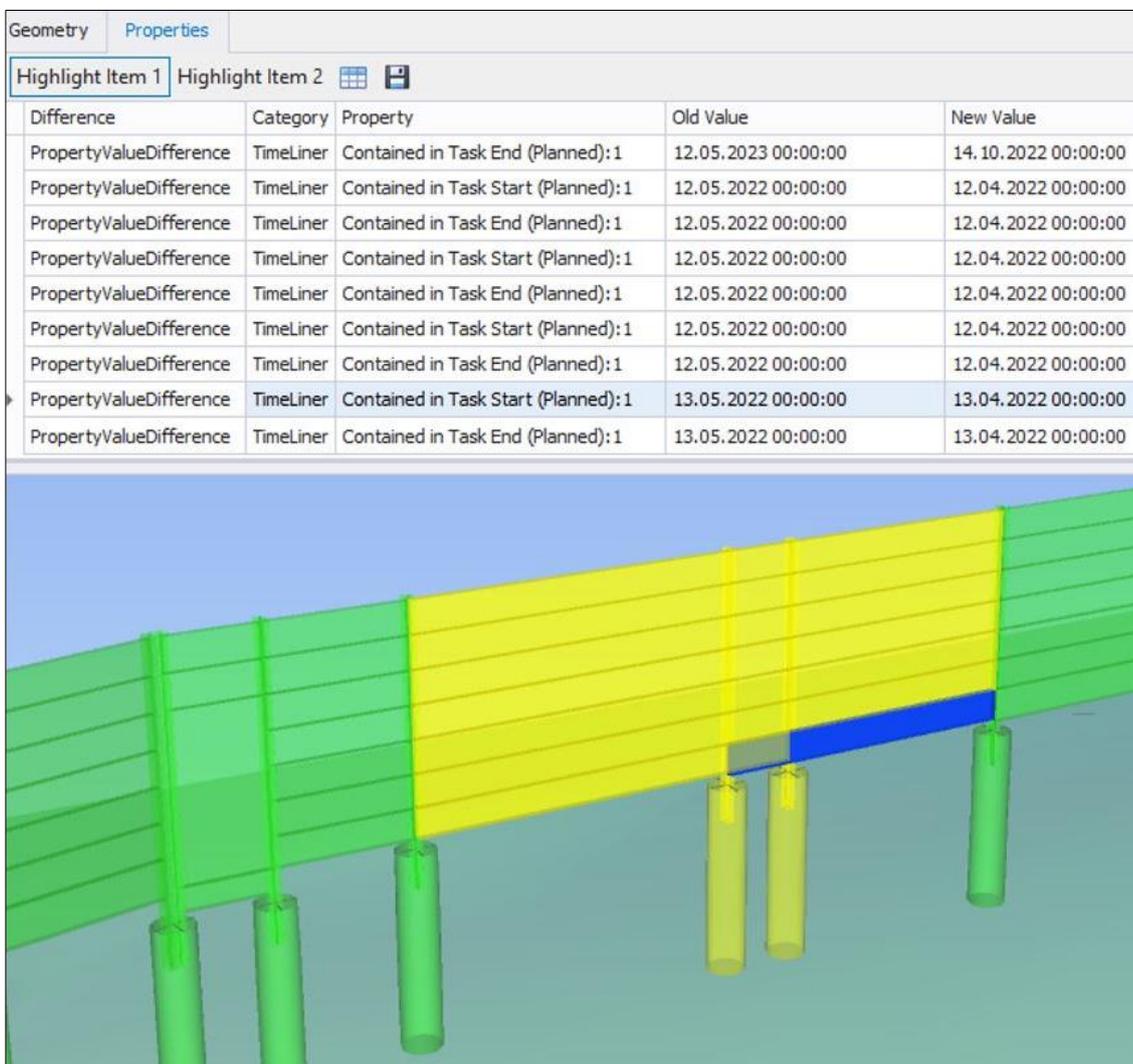


Abbildung 6-8: Geometrischer und semantischer Modellvergleich³²⁸

³²⁸ Eigene Darstellung

Werden innerhalb des Modellvergleichs keine Abweichungen festgestellt, so ist der Prozess der Modellaktualisierung gemäß Abbildung 6-6 erfolgreich beendet. Wurde hingegen aufgrund von Abweichungen ein entsprechender Bericht generiert, so muss dieser mit den verantwortlichen Personen abgestimmt und die Ergebnisse in den Design-Prozess überführt werden. Dadurch ändern sich wiederum die Modelldaten und der Prozess der Modellaktualisierung ist erneut zu durchlaufen.

Modellbasierte Absteckung und Erfassung

Sofern der Digitale Schatten Informationen enthält, die noch nicht auf der Baustelle umgesetzt sind, sprich Design-Informationen, liegt er nach der jeweiligen Aktualisierung gemäß Abbildung 6-2 in Form eines *Project Intend Information* vor. Im Hinblick auf die in der vorliegenden Fallstudie angewendete Funktionsstufe 2 (gemäß Kapitel 5.3, Abbildung 5-5) erfolgt die Übertragung der Daten zur Baustelle entsprechend der Definition des Digitalen Schattens in einer manuellen Datenübertragung mittels Exports. Einerseits werden die Designinformationen für die Steuerung des Projekts auf der Baustelle durch *Output: Design* verwendet. Andererseits werden die Statusinformationen für die Überwachung des Projekts durch die Projektleitung mittels grafischer Benutzungsoberfläche herangezogen. Der zugehörige Export ist *Output: Status*.

Das *Output: Design* aus dem Digitalen Schatten entspricht dem *Input: Design* für den Bauprozess auf der Baustelle. Diesbezüglich wird jedoch nicht eine automatisierte Verbindung zu Aktorik auf der Baustelle als Verbindung des virtuellen zum physischen Teil des Bauwerks hergestellt, sondern durch die Verwendung von Informationen der topografischen Punkte aus dem Planmodell durch eine ausführende Person mittels Ex- und Imports von Daten. In der vorliegenden Fallstudie wird diesbezüglich der Prozess der modellbasierten Absteckung von Planungsdaten in das Baugelände durchgeführt.

Diese Art der Bearbeitung erreicht einen mittleren Automatisierungsgrad. Die Übertragung der Daten erfolgt automatisiert, lediglich der Weg zu den entsprechenden Koordinaten auf der Baustelle sowie das Aufhalten der Reflektoren muss von Personen durchgeführt werden. Vorgelagerte Prozesse, die dazu dienen, die Modelldaten so aufzubereiten, dass sie auf den Baustellen in wenigen Schritten umgesetzt werden, sind durch entsprechende Technik weitestgehend automatisiert möglich. Der vorgelagerte Prozess der Aufbereitung in der Fallstudie erfolgt innerhalb der zentralen Koordinationssoftware und damit innerhalb des Digitalen Schattens gemäß Abbildung 6-9.

Mittels automatisierter Prozesse werden diese in regelmäßigen Abständen auf eine weitere Plattform übertragen, damit sie dort für die geodätischen Arbeiten verwendet werden können. Dies ist deshalb notwendig, da es in den in der Fallstudie genutzten Systemen noch nicht möglich ist, alle Arbeiten über dieselbe Plattform zu steuern oder durchzuführen. Dazu werden mittels automatisierten Separierungsmöglichkeiten unter Einbeziehung des Bauablaufplans diejenigen Modellelemente separiert, die zum aktuellen Zeitpunkt auf der Baustelle abgesteckt

werden sollen. Nur dieser Teil des Modells wird exportiert.³²⁹ Er stellt somit den *Output: Design* nach Abbildung 6-2 dar. Seine Verwendung und damit der *Input: Design* erfolgt durch die Cloud-Lösung des verwendeten Geräteherstellers, nachfolgend auch *Cloud-Lösung TLS* genannt.

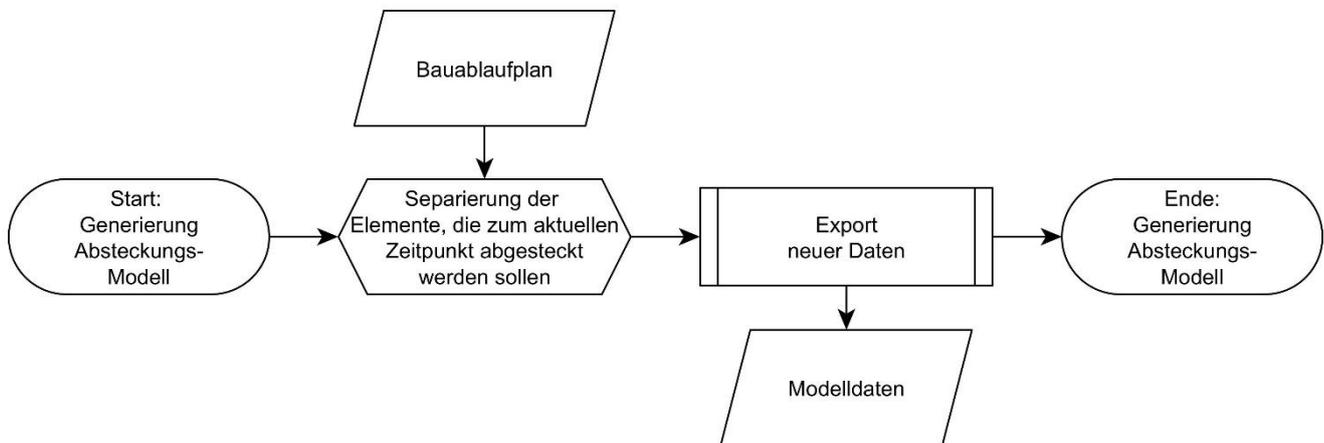


Abbildung 6-9: Prozess: Aufbereitung der Modelldaten für den Absteckungsprozess³³⁰

Der Prozess zur Absteckung auf der Baustelle erfolgt gemäß Abbildung 6-10 durch automatisierte, vorbereitende Abläufe. Diese beinhalten innerhalb der *Cloud-Lösung TLS* (gemäß Abbildung 6-2) zwar die manuelle Auswahl des aktuellen Projektes, alle weiteren Schritte wie unter anderem das Einbeziehen der Modelldaten erfolgen automatisiert. Im Anschluss ist das terrestrische Erfassungsmedium - in der Fallstudie wird eine sog. Totalstation³³¹ verwendet - zu stationieren. Das bedeutet, der aktuelle Standpunkt des Gerätes ist koordinatenmäßig zu erfassen, sodass alle davon ausgehend abgesteckten Punkte koordinatenmäßig bekannt sind. Dem folgt das Abstecken mittels sog. Prismen.³³² Nähere Informationen zum Themenbereich *Absteckung* der Geodäsie können entsprechende Fachliteratur entnommen werden.

³²⁹ Im Zuge der Umsetzung wurden unterschiedliche Varianten untersucht, in denen unter anderem auch das Modell ganzheitlich für die Absteckung exportiert wurde. Dieser Ablauf ermöglichte zwar den höchsten Automatisierungsgrad. Die Handhabung der Hard- und Software auf der Baustelle wurde jedoch durch den Umfang der Modelldaten erschwert. Aus diesem Grund wurde sich dazu entschieden, den Weg vornehmlich über eine Vorarbeit mit höherem manuellem Aufwand zu verwenden. Dadurch wurde allerdings die Arbeit auf der Baustelle nach Aussagen des Fachpersonals erleichtert und beschleunigt.

³³⁰ Eigene Darstellung

³³¹ Weiterführende Informationen zur eingesetzten Trimble S9 Robotik-Totalstation können beim Hersteller Trimble angefragt werden

³³² Weiterführende Informationen zum eingesetzten Trimble MultiTrack Prisma MT1000 können beim Hersteller Trimble angefragt werden

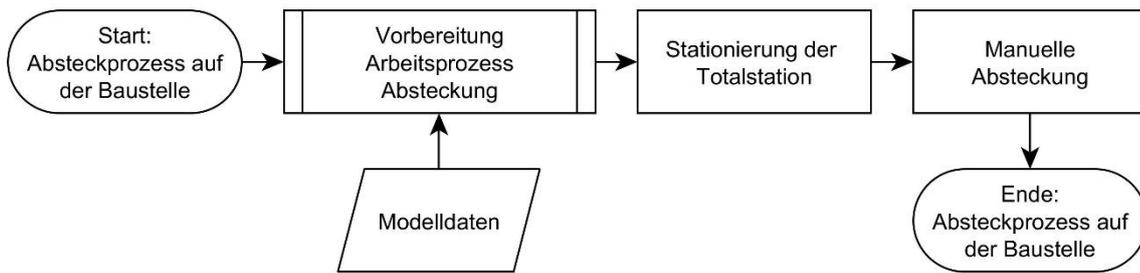


Abbildung 6-10: Prozess: Modellbasierte Absteckung auf der Baustelle³³³

Werden bei der Absteckung Abweichungen zum Planungsstand ausgeführt, so können auch diese mittels des beschriebenen Prozesses in die Modelldaten auf der zentralen Plattform überführt und die Plandaten somit aktualisiert werden. Hierbei ist anzumerken, dass die resultierenden Informationen ausschließlich die Plandaten darstellen und daher noch keine as-built-Dokumentation vorliegt. Eine invertierte Vorgehensweise ermöglicht durch dieselbe Software und damit durch der Absteckung ähnliche Prozesse eine Überprüfung der vorher auf die Baustelle übertragenen Punkte und folglich die Erfassung des Ist-Zustands bereits erstellter Bauteile. Das bedeutet, die Prozesse gleichen sich und man erhält eine redundante Basis, die zu einer Vereinfachung führt. Werden die Punkte oder Kanten ausgewählter Elemente mittels Totalstation erfasst, so können die Ergebnisse direkt in das Modell als eine Abweichungsanalyse überführt werden, deren Ergebnisse wiederum als Aktualisierung in das as-built Modell eingebracht werden können. Man spricht vom *Output: Monitoring* aus dem mobilen Endgerät der Baustelle innerhalb der Sphäre des Bauprozesses gemäß Abbildung 6-2 und innerhalb der Sphäre der Digitalen Schatten vom *Input: Monitoring*.

Im Sinne einer Dokumentation der Historie und folglich für eine mögliche Analyse von Soll-Ist-Abweichungen werden die eben genannten Abweichungsinformationen in dem Bauwerksinformationsmodell gespeichert. Es ist jedoch zu prüfen, ob jede einzelne Abweichung im zentralen Modell vorgehalten werden sollte. In den aktuell verwendeten Systemen kann ein solches Vorgehen zu einer sehr hohen Datenmenge führen, die ggf. nicht ausreichend ausgewertet werden kann. Es ist je nach Projektumfang zu überlegen, ob ein separates Modell vorgehalten wird, in das alle Abweichungen zwischen Planung und Ausführung und alle betrachteten Varianten umgesetzt werden. Vor dem Hintergrund von Möglichkeiten der Methoden der *Data Science*³³⁴ könnten auf diese Weise zielführende Ergebnisse als Auswertungen erreicht werden. Für weitere Informationen zum Themenbereich der Data Science ist entsprechende Fachliteratur heranzuziehen.

Während der Erfassung des Ist-Zustands auf der Baustelle werden alle Vorgänge mit Fotos automatisch erfasst und in einem Dokument exportiert. Dies dient einer Beweissicherung sowie

³³³ Eigene Darstellung

³³⁴ Data Science bezeichnet grundlegend die Verarbeitung von großen Datenmengen bezeichnet, aus denen mittels wissenschaftlicher Methoden und Verfahren Erkenntnisse extrahiert werden. Für weiterführende Informationen ist entsprechende Fachliteratur hinzuzuziehen

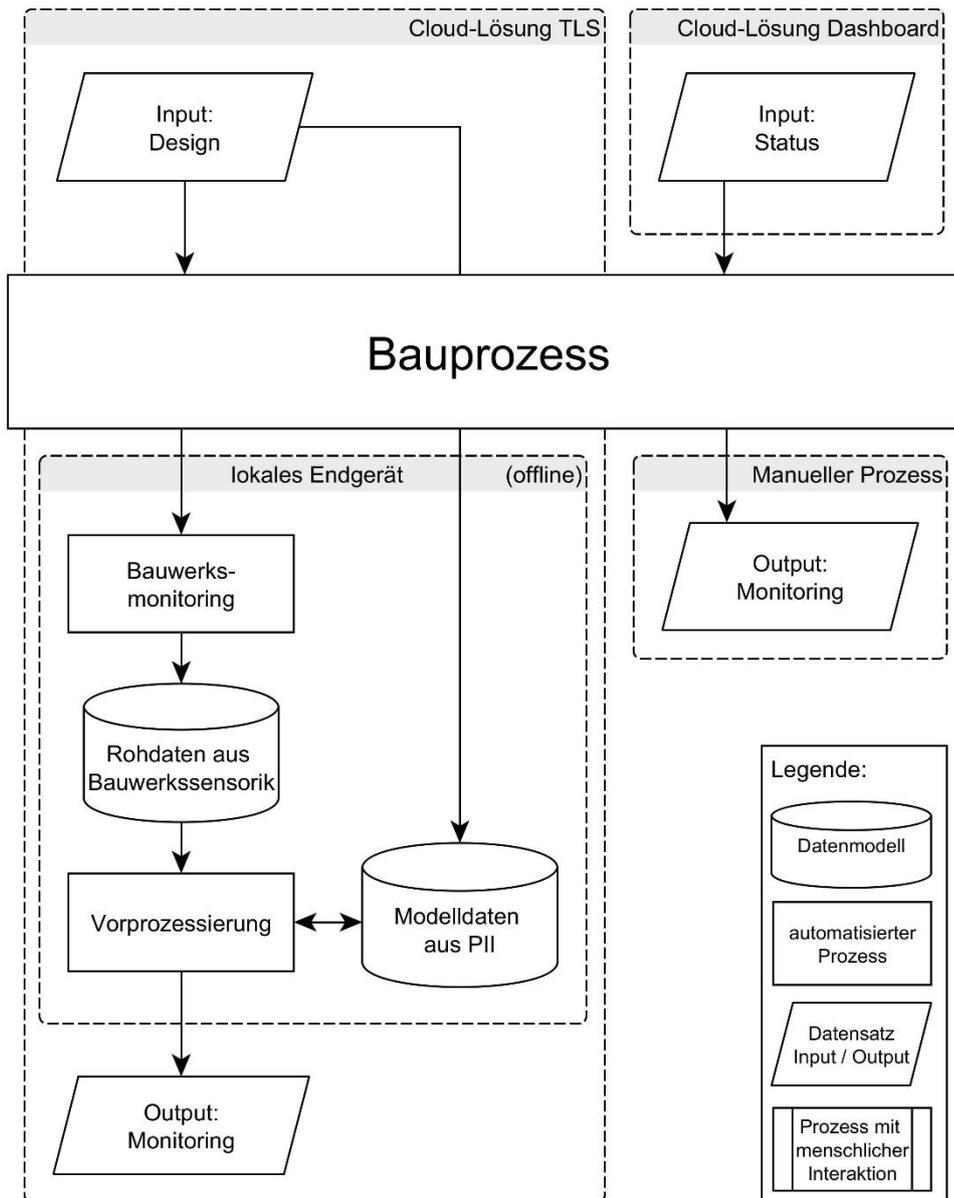
einer Mangedokumentation. Diese Dokumente werden im Zuge der Sicherung wiederum automatisiert an den entsprechenden Stellen im Bauwerksinformationsmodell verortet. Man erhält automatisiert eine Dokumentation.

Baustellenbezogene Prozesse zur Erfassung des Leistungsstandes

Der vorangehende Abschnitt beschreibt nach Abbildung 6-2 die Übertragung von Informationen aus dem Digitalen Schatten zur Verwendung auf der Baustelle. Nachfolgend werden nun diejenigen Prozesse der Fallstudie dargestellt, die sich mit der automatisierten Erfassung ausgewählter Zustände auf Baustellen und deren zeitnaher Verwendung innerhalb des Digitalen Zwillings auseinandersetzen. Stellvertretend für diesen Erfassungsprozess werden zwei unterschiedliche Varianten für eine Durchführung beschrieben. Abbildung 6-11 stellt diesbezüglich den Teilausschnitt aus Abbildung 6-2, S. 135 über die Erfassung des Bauprozesses auf der Baustelle dar.

Bei den baustellenbezogenen Prozessen erfolgt einerseits die Erfassung der Leistungsinformation in der Fallstudie in einem teilautomatisierten Prozess. Dieser wird mittels terrestrischem Laserscan (vgl. Kapitel 4.2) durchgeführt, welcher grundsätzlich einen hohen Grad an Automatisierung aufweist, bis dato jedoch an verschiedenen Stellen auf manuelle Bearbeitung angewiesen ist. Daher wird in Summe ein mittlerer Automatisierungsgrad erreicht. Ausgewählte dieser manuellen Prozesse werden im Nachgang erläutert. Andererseits erfolgt die Erfassung des Bauzustandes durch die manuelle Eingabe von Daten in den Digitalen Schatten. Es sei darauf hingewiesen, dass an dieser Stelle beide Varianten dargestellt werden, da nicht bei allen zu betrachteten Projekten eine umfangreiche Erfassung mittels terrestrischem Laserscan und deren zugehörigen Rahmenbedingungen möglich ist. Diese Rahmenbedingungen haben unter anderem hohen zeitlichen sowie finanziellen Ursprung und sind aus diesen Gründen nur bedingt möglich oder notwendig. Bei Projekten geringeren Umfangs und auch geringerer Komplexität erweist sich daher der Grad der Automatisierung durch das manuelle Eingeben des aktuellen Leistungsstandes zwar als niedrig. Ein Mehrwert durch Automatisierung wird jedoch in der Art der Eingabe und der Überführung dieser Daten in den Prozess des Projekt-Controllings erreicht. Dieser Verlauf entspricht dem *Output: Monitoring* innerhalb des manuellen Prozesses im Anschluss an den Bauprozess in Abbildung 6-2.

Im Gesamtkontext der teilautomatisierten Erfassung mittels terrestrischem Laserscan erfolgt eine hybride Datenspeicherung. Die entsprechenden Daten werden grundsätzlich durchgehend auf der Cloud-Lösung des Hardwareanbieters vorgehalten (Cloud-Lösung TLS gemäß Abbildung 6-11). Aufgrund der hohen Datenmenge, die bei einem solchen Laserscan entsteht, wird die Methode des *Edge-Computing* verwendet. Die Daten, die grundsätzlich innerhalb der Cloud-Lösung gespeichert sind, werden zusätzlich *offline*, sprich auf dem mobilen Endgerät ohne kontinuierliche Anbindung an die Datenquelle innerhalb der Cloud-Lösung vorgehalten und vorprozessiert. Erst nachdem die Vorprozessierung der Rohdaten aus dem Bauwerksmonitoring abgeschlossen ist, werden deren Ergebnisse auf die Cloud-Lösung übertragen und dort endgültig ausgewertet.

Abbildung 6-11: Baustellenbezogene Prozesse³³⁵

Die genannte Vorprozessierung ermöglicht den Benutzenden bereits während der Aufnahme eine grobe Überprüfung der Daten auf Prozessfehler. Die Rohdaten aus dem Bauwerksmonitoring werden diesbezüglich klassifiziert und vorprozessiert, sodass sie gegenüber den Daten aus dem *Input: Design* in Form des PII in grober Form abgeglichen werden können. Dieser grobe Abgleich erfolgt in der Fallstudie durch einen Abgleich der geometrischen Passgenauigkeit. Diesbezüglich wird in Abbildung 6-12 dargestellt, wie eine Abweichung der Plandaten aus dem PII gegenüber der tatsächlichen Bauausführung, die durch einen Laserscan erfasst wird, aussehen kann. Der untersuchte Rahmenträger, bestehend aus unterschiedlichen HE-Trägerprofilen,

³³⁵ Teilausschnitt aus Abbildung 6-2

ist in dem Brückenbauprojekt der Fallstudie während der Erfassung bereits zu einigen Teilen eingebaut. Der geplante Rahmenträger in seiner endgültigen Form ist innerhalb des mobilen Endgerätes in grüner Farbe und in leicht transparenter Form dargestellt. Durch diese visuelle Überlagerung der Realität (engl. *Augmented Reality*) werden vorab ausgewählte, zu prüfende Modellelemente aus dem Planmodell innerhalb der aktuellen visuellen Darstellung des terrestrischen Laserscans eingebunden.

Es lässt sich in Abbildung 6-12 erkennen, dass einzelne der vorderen HE-Träger eine hohe Passgenauigkeit bezogen auf die Geschosdeckendurchbrüche aufweisen. Im hinteren Bereich der Darstellung auf dem mobilen Endgerät weisen die eingebauten HE-Träger gegenüber dem Planmodell hingegen eine höhere visuelle Abweichung auf.

Ein solcher Vorabgleich kann bis dato nicht dazu verwendet werden, eine feine Abweichung bereits während der Aufnahme zu detektieren. Er dient vorwiegend der Orientierung und bringt bei einer fehlerhaften Aufnahme den Vorteil einen Mangel frühzeitig festzustellen, während die betreuende Person die Baustelle noch nicht verlassen hat und ggf. eine erneute Erfassung im Nachgang durchführen muss.

Im Anschluss an die Vorprozessierung wird die Verbindung zur Datenquelle innerhalb der Cloud-Lösung hergestellt und die Ergebnisse der Berechnung werden transferiert resp. synchronisiert. Üblicherweise wird dieser Prozess im Sinne des *Cloud Computing* zu dem Zeitpunkt durchgeführt, an dem eine stabile und kostengünstige Verbindung zur Datenquelle mit einer hohen Datenrate zur Verfügung steht.



Abbildung 6-12: Geometrischer Vorabgleich des Leistungserfassung³³⁶

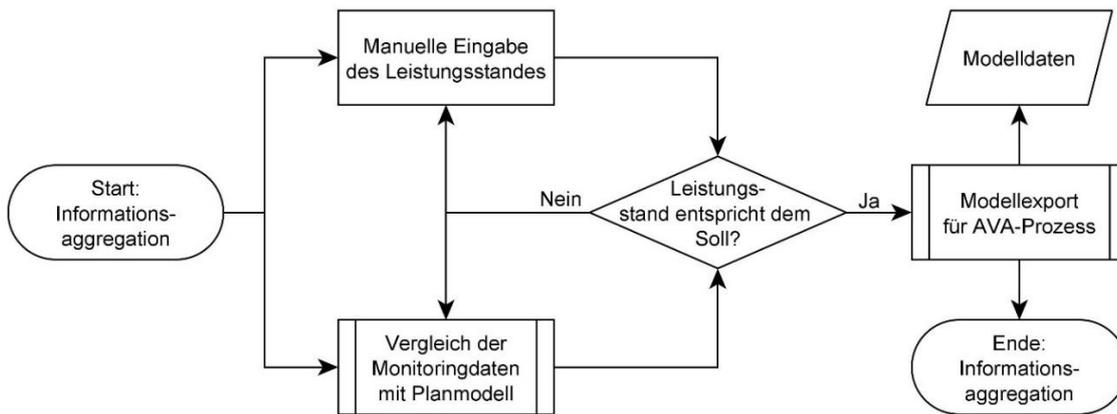
³³⁶ Eigene Darstellung

Die Rückführung der Daten aus dem Bauwerksmonitoring auf die Cloud-Lösung TLS und die dortige ganzheitliche Bearbeitung der Laserscan-Daten resultiert in der vorliegenden Fallstudie wiederum in einem Export, einem *Output: Monitoring* gemäß Abbildung 6-11. Das zugehörige *Input: Monitoring* wird in Abbildung 6-2 dargestellt. Diesbezüglich werden die entsprechenden Daten in Form einer Punktwolkendatei verwendet und direkt in die zentrale Koordinationssoftware dieser Fallstudie, den Digitalen Schatten eingebunden. Der zugehörige Prozess wird im Zuge der Erläuterung des Vergleichs der Monitoringdaten mit dem Planmodell gemäß Abbildung 6-15 betrachtet.

Die Einbindung von Daten aus dem Monitoring-Prozess überführt die betrachteten Bereiche des Digitalen Schattens in die Form eines Datenmodells, bestehend aus Informationen der Bauwerkssensorik. Diese werden nach Einbindung der Monitoring-Daten interpretiert und auf Konformität geprüft. Diesbezüglich wird auch von einer Informationsaggregation gesprochen, da die Daten aus dem Monitoring, sprich die Daten aus dem Laserscan als Punktwolke für den Abgleich mit dem Planmodell genutzt werden. Vereinfacht gesagt, wird das bestehende Planmodell mit zusätzlichen Informationen erweitert und sozusagen in die Form PSK (*Project Status Knowledge*, vgl. Kapitel 5.3, S. 103) überführt. Nach der Interpretation und der Konformitätsprüfung besteht folglich Gewissheit über den aktuellen Stand des Bauwerks. Der virtuelle Teil des Bauwerks liegt in der Konsequenz als Wissen bezüglich des Status von Produkt und Prozessen vor.

Der zugehörige technische Prozess der Informationsaggregation der Daten aus dem Bauwerksmonitoring erfolgt im Realisierbarkeitstest gemäß Abbildung 6-13 auf zwei Arten. Im ersten Fall erfolgt die Eingabe des Leistungsstandes ganzheitlich manuell. Im zweiten Fall, dem Vergleich von Monitoring-Daten in Form einer Punktwolke mit dem Planmodell, erfolgt die Eingabe teils automatisiert, teils manuell. Eine vertiefte Betrachtung einer ganzheitlich automatisierten Überprüfung wird im Realisierbarkeitstest nicht durchgeführt, da dies nicht im Sinne der Forschungsfragen ist und den Rahmen der Arbeit überschreiten würde.

Bevor auf die beiden Arten dedizierter eingegangen wird, wird der weitere Verlauf der Aggregation von Monitoring-Daten beschrieben. Ist diesbezüglich ein Unterschied zwischen dem Soll und dem erfassten Leistungsstand erkennbar, so wird der verwendete technische Prozess der Informationsaggregation erneut durchlaufen, bis der Leistungsstand dem Soll entspricht. Wenn dies der Fall ist, werden die Informationen für die Verwendung innerhalb der Ausschreibungs-, Vergabe- und Abrechnungssoftware aufbereitet. Diese Aufbereitung endet mit dem Export der Modelldaten.

Abbildung 6-13: Prozess: Aggregation von Monitoring-Daten³³⁷

Der Prozess der manuellen Eingabe der Leistungserfassung ist in Abbildung 6-14 dargestellt. Er erfolgt innerhalb der zentralen Koordinationssoftware und somit im Kern des Digitalen Schattens. Anfangs werden unter Verwendung des Bauablaufplans alle Elemente separiert, die im jeweils aktuellen Zeitraum erstellt sein sollten. Im Anschluss werden von der für die Eingabe zuständigen Person diejenigen Elemente separiert, die tatsächlich auf der Baustelle erstellt worden sind. Entsprechende Informationen werden im Bedarfsfall durch die Bauleitung zur Verfügung gestellt. Innerhalb dieser Elemente wird eine manuelle Überprüfung der geometrischen und semantischen Korrektheit durch die Anwender und Anwenderinnen durchgeführt. Diese Überprüfung sieht vor, dass geometrische Randdaten auf der Baustelle manuell überprüft und nötigenfalls entsprechend manuell in das Modell eingetragen werden. Mit semantischen Abweichungen wird ebenso verfahren. Treten Abweichungen auf, werden diese vorerst gesammelt. Treten keine Abweichung auf, so wird den fertig gestellten Elementen automatisiert der aktuelle Zeitpunkt als Attribut im entsprechenden Attributsschlüssel zugewiesen.

Sind alle Elemente der ersten Separierung erstellt und somit das Soll erfüllt, wird ein Bericht mit den erstellten Elementen generiert und der Projektleitung zur Verfügung gestellt. Sind nicht alle Elemente geometrisch oder semantisch nach den Soll-Vorgaben fertig gestellt, so wird die Abweichung anhand der Modelldaten entsprechend visuell aufbereitet. Im Anschluss wird ein Bericht generiert, der ebenfalls der Projektleitung zur Verfügung gestellt wird. Aufgrund der notwendigen Rückmeldung aus der Projektleitung, ist eine Verzögerung unbekannter Dauer in den Prozess einzuplanen.

³³⁷ Eigene Darstellung

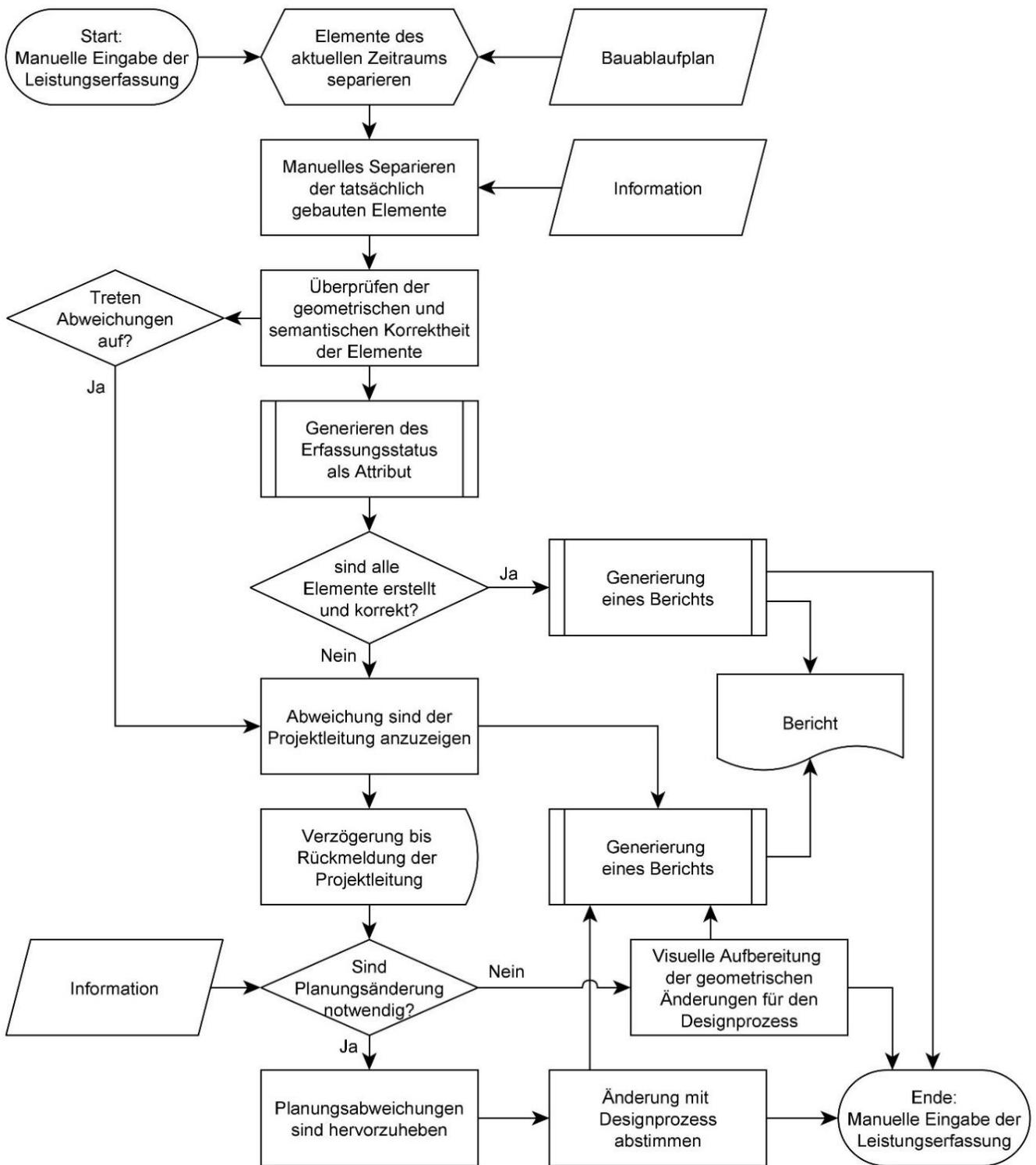


Abbildung 6-14: Prozess: Manuelle Eingabe des Leistungsstandes³³⁸

³³⁸ Eigene Darstellung

Abgleich der Monitoringdaten mit dem Planungsstand

Resultieren nach Rückmeldung durch entsprechende Informationen der Projektleitung aus der Verzögerung des Erstellungsprozess keine Anforderungen an eine Planungsänderung, so werden die geometrischen in Verbindung mit den semantischen Abweichungen visuell aufbereitet. Daraus wird wiederum ein Bericht generiert und an die Verantwortlichen des Designprozesses gemeldet. Resultieren hingegen Anforderungen an eine Planungsänderung, werden Abweichungen zusammen mit benachbarten resp. prozessbedingt abhängigen Elementen ebenfalls geometrisch sowie visuell aufbereitet. Im Anschluss werden diese mit dem Designprozess auf Basis des automatisch generierten Berichtes abgestimmt.

Für den Vergleich der Informationen aus dem baustellenbezogenen Bauwerksmonitoring wird die Punktwolke des terrestrischen Laserscans als Input für den Digitalen Schatten und somit für die zentrale Koordinationssoftware als *Input: Monitoring* gemäß Abbildung 6-1: Übersicht der Datenmodelle mit Input und Output im Realisierbarkeitstest verwendet. In der vorliegenden Fallstudie wird ein proprietäres Format für die Punktwolke gewählt, welches eine hohe Kompatibilität zwischen der *Cloud-Lösung TLS* und der für die zentrale Steuerung verwendeten Software aufweist. Der Ablauf des Vergleichsprozesses erfolgt gemäß Abbildung 6-15.

Im Zuge der Projektarbeit werden innerhalb des Vergleiches der Monitoringdaten mit dem Planmodell eine Vielzahl an Elementen geprüft. Aufgrund des Umfangs wird daher im Realitätstest der Prüflauf lediglich exemplarisch anhand eines einzelnen Elementes beschrieben.

Nach Beginn des Prozesses und damit nach Start der Verwendung der zentralen Koordinationssoftware wird die Verbindung des Modells zum Terminplan verwendet, um automatisiert all-diejenigen Elemente im Planmodell zu separieren, die im gewünschten Zeitraum geprüft werden sollen. Dieser Schritt ist erforderlich, um einerseits keine Elemente in den Vergleich zu involvieren, die unter anderem in der Realität noch nicht gebaut wurden oder die möglicherweise nicht mehr vorhanden sind. Dieser Fall trifft unter anderem bei temporären Elementen zu. Andererseits ist die Anwendung dieses Automatismus notwendig, um die Prozessdauer des für den Vergleich durchlaufenden Algorithmus nicht ohne eine entsprechende Notwendigkeit zu erhöhen.

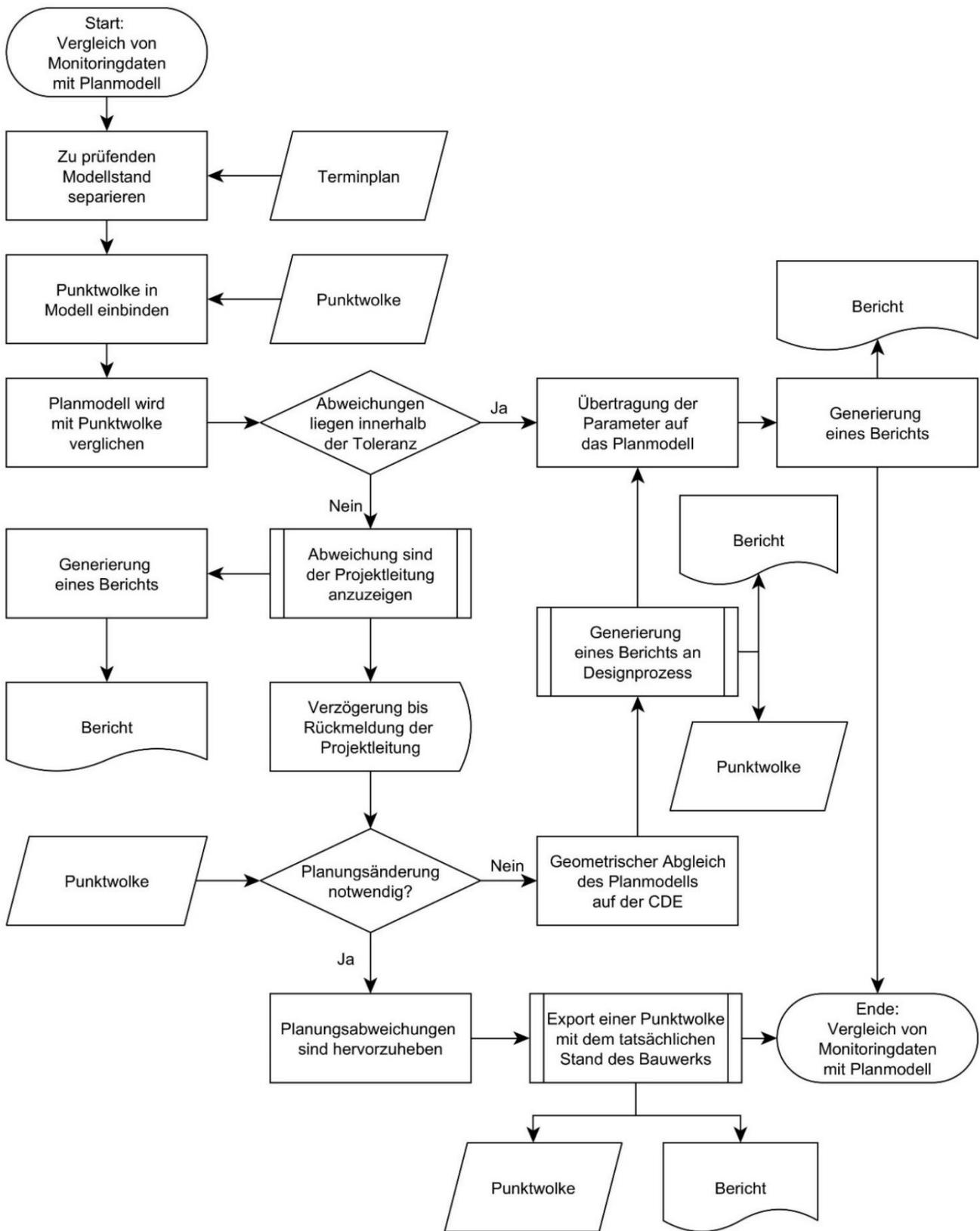


Abbildung 6-15: Prozess: Vergleich der Monitoringdaten mit dem Planmodell³³⁹

³³⁹ Eigene Darstellung

Im Anschluss sollten adäquate Ausschnitte der Punktwolke generiert werden, die einzig diejenigen Bereiche des Bauwerks darstellen, welche im aktuellen Betrachtungszeitraum erforderlich sind. An dieser Stelle sei angemerkt, dass in der betrachteten Software eine automatisierte Bereitstellung nur desjenigen Bereiches, der betrachtet werden soll, nicht möglich ist. Der Bearbeiter muss an dieser Stelle manuell eingreifen. Diese Einschränkung ist eine derjenigen Einschränkungen, warum ein ganzheitlich automatisierter Vergleich der Punktwolke mit dem gesamten Modell nicht möglich ist. Ohne näher auf den Algorithmus des Vergleiches einzugehen, sei angemerkt, dass innerhalb der Laufzeit des Vergleichs-Algorithmus aus allen in der Punktwolke vorhandenen Punkten sog. *Vergleichsebenen* gebildet werden, die als Vergleichsbasis für die Objekte herangezogen werden. Aus den Objekten des zu vergleichenden Modells werden während der Laufzeit ebenfalls solche Ebenen extrahiert, die dann mit denjenigen Ebenen der Punktwolke verglichen werden. Sind somit eine sehr große Menge an Punkten und ebenfalls eine große Menge an Objekten vorhanden, so potenziert sich der Rechenaufwand, da jeweils alle Ebenen der Punktwolke mit allen Ebenen der Objekte verglichen werden. Für nähere Informationen kann entsprechende Fachliteratur herangezogen werden.

Wie ein Abgleich von Monitoringinformationen mit dem Planungsstand visuell aussieht, wird in Abbildung 6-16 dargestellt. Diese Abbildung zeigt einen Ausschnitt aus der verwendeten Punktwolke mit einem zu vergleichenden Objekt, welches innerhalb des zu betrachtenden Zeitraums liegt. Dieses Objekt stellt im Brückenbauprojekt eine Korsettierung resp. die Bandage einer Tragwerksstütze dar, auf deren Konsolen im Verlaufe der Sanierung temporär HE-Träger innerhalb des Brückenbauwerks aufgelegt werden, um auftretenden Lasten aus dem Bauwerksüberbau in den Untergrund abzuleiten.

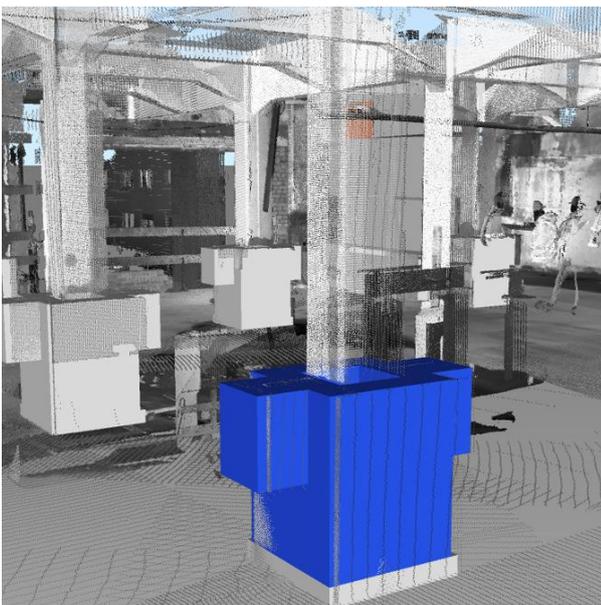


Abbildung 6-16: Überlagerung des Plan-Modells mit der Punktwolke³⁴⁰

³⁴⁰ Eigene Darstellung

Nach der Einstellung der Sichtbarkeit der zu prüfenden Elemente erfolgt die Prüfung mit einer voreingestellten Toleranz. Der Prozess verläuft automatisiert und erreicht eine Prozessierungsdauer, die sich äquivalent zur Menge an Modellelementen sowie der Größe des Ausschnitts der Punktwolke erhöht. Vor dem Hintergrund der Automatisierung dieses Vergleichsprozesses ist zu bemerken, dass die Verarbeitung der Informationen innerhalb der Software teilautomatisiert erfolgt. Dabei werden diese Informationen mittels spezifischer Software automatisiert vorinterpretiert. Resultierende Informationen oder Geometrieänderungen werden jedoch erst nach entsprechender manueller Prüfung in die Modelldaten übernommen. Die Separierung der zu vergleichenden Abschnitte aus Planmodell und Punktwolke kann grundsätzlich so gewählt werden, dass ein großer Bereich des Projektes abgedeckt wird. Es sei jedoch angemerkt, dass die Berechnungsdauer auf dem betrachteten System mit den benötigten Ausschnitten recht groß ist, sodass eine zeitnahe Auswertung nur dann möglich ist, wenn die Bereiche mit entsprechend geringem Umfang gewählt werden könnten. Dieser Fall ist in der Fallstudie aufgrund geometrischer Abhängigkeiten jedoch nicht möglich.

Im Nachgang an die Berechnung muss eine Vielzahl an Prozessen manuell bearbeitet werden. Diese Prozesse sind nicht separat in Abbildung 6-16 dargestellt, da sie dem Prozess *Planmodell wird mit Punktwolke verglichen* zuzuordnen sind. In der Durchführung wird am Ende des Vergleichs eine Übersicht aller Resultate dargestellt, in der diese einzeln zu bewerten sind. Das Konzept der Software sieht diesbezüglich eine manuelle Bestätigung des jeweiligen Abgleiches vor. Im Zuge einer Dokumentation und Beweisführung ist diese Vorgehensweise dem Verfasser dieser Arbeit nachvollziehbar. Vor dem Hintergrund der Automatisierung bietet dies hingegen noch Verbesserungspotenzial.

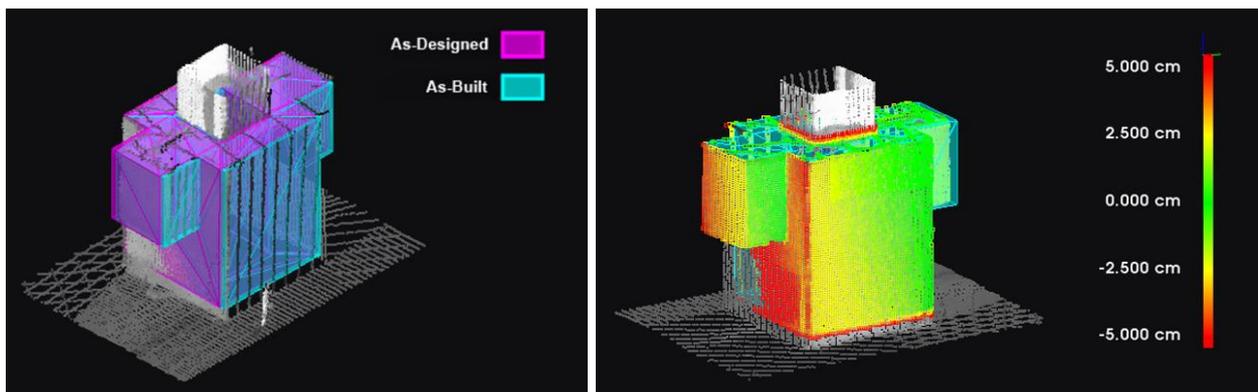


Abbildung 6-17: Abweichungen beim Vergleiche der Punktwolke mit dem Planmodell³⁴¹

Die in dem Vergleich errechneten Abweichungen sind in Abbildung 6-17 dargestellt. Auf der linken Seite ist die Überlagerung des geplanten Zustands des Bauwerks innerhalb des Planmodells resp. des Modells im Zustand *As-Designed* in der Farbe Magenta zu erkennen. Darüber

³⁴¹ Eigene Darstellung

hinaus wird ein äquivalentes Objekt in der Farbe Zyan angezeigt. Dies stellt die gebaute Geometrie auf der Baustelle resp. das Modell im Zustand *As-Built* dar und wird aus der Punktwolke und der geplanten Geometrie errechnet. Zentimetergenaue Abweichungen des jeweiligen Modells als *As-Designed* resp. *As-Built* werden im rechten Bereich der Abbildung dargestellt. Je weiter die Abweichungen von Null cm abweichen, desto mehr färbt sich die Darstellung von grün über gelb bis hin zu rot. Diese Darstellung wird in dem zugehörigen automatisiert erstellten Bericht eingetragen. Der Bericht liegt in unterschiedlichen Datenformaten vor, sodass er jeweils den entsprechenden Personen im gewünschten Format zur Verfügung gestellt werden kann.

Sind im Vergleich der Monitoringdaten mit dem Planmodell Abweichungen bei Bauteilen aufgetreten, die außerhalb der aufnahmebezogen unterschiedlich eingestellten Toleranz liegen, werden diese entsprechend kommentiert und innerhalb des Planmodells eingetragen. All diejenigen Elemente, deren geometrische Abweichungen innerhalb der Toleranz liegen, werden automatisiert innerhalb der zentralen Koordinationssoftware in Richtung der Fehlstellungen korrigiert. Je nach Umfang der Abweichungen innerhalb der Toleranz fällt die Korrektur höher oder geringer aus. Es liegt somit bei diesen Elementen ein Digitaler Schatten in Form eines *as-built*-Modells vor.

Nach der geometrischen Korrektur der Elemente werden ausgewählte Parameter und eventuell vorhandene Kommentare automatisiert in das Planmodell übertragen. Wichtige solcher Parameter sind unter anderem die aufgetretenen Abweichungen, der Fertigstellungsstatus und das Fertigstellungsdatum. All diese Informationen werden automatisiert generiert. Nach Abschluss der Übertragung der Parameter wird wiederum ein Bericht über den Status der Elemente erstellt und den Projektleitenden zur Verfügung gestellt.

Treten solche Abweichungen bei dem Vergleich auf, die außerhalb der Toleranz liegen, so werden sie gemäß Abbildung 6-16 der Projektleitung angezeigt. Es erfolgt erneut die Generierung eines entsprechenden Berichtes, welcher der Projektleitung zur Verfügung gestellt wird. Aufgrund der manuellen Einwirkungen innerhalb dieses Projektschrittes tritt im Prozessverlauf eine Verzögerung unbestimmten Ausmaßes auf. Diese Entscheidung durch die Projektleitung kann für den Projektprozess unterschiedlich ausfallen. Im Zuge der Automatisierung des Modellvergleichs wird daher vereinfacht unter folgenden Entscheidungsmöglichkeiten unterschieden. Es wäre möglich, dass die Abweichung innerhalb der Elemente zu einer Änderung führen, die den Designprozess betrifft und dort wiederum eine Änderung hervorrufen. Die andere Möglichkeit wäre, dass die Abweichung keine Änderung innerhalb des Designprozess bezogen auf andere Projektelemente hervorrufen. Tritt der erste der beiden Fälle ein, so wird das Planmodell mittels Automatismus auf die neue geometrische Situation angepasst. Es wird ein Bericht inklusive einer Abbildung der Änderung in Form einer Punktwolke generiert, welcher wiederum den Verantwortlichen des Designprozesses zur Verfügung gestellt wird. Diese überführen folglich die Änderung in das Designmodell. Der neu abgestimmte Stand stellt nun die *as-built*-Situation dar. Die entsprechenden Parameter, unter anderem die Abweichung, der Fertigstellungsstatus und das Fertigstellungsdatum werden in das Modell transferiert. Bericht und Punktwolke stellen dabei eine mögliche Beweislast gegenüber Dritten dar. Zum Abschluss wird erneut ein Bericht

generiert, der die as-built-Situation inkl. entsprechender semantischer Informationen für eine Dokumentation resp. Beweisführung beinhaltet.

Tritt der zweite Fall ein, bei dem die Abweichungen außerhalb der Toleranz liegen und sie zu Änderungen unter anderem an angrenzenden Bauteilen oder deren Prozessen führen, so werden die Planungsabweichung explizit im Modell hervorgehoben und es wird daraus eine Punktwolke sowie ein Bericht generiert, die wiederum den Verantwortlichen des Designprozesses zur Verfügung gestellt werden. Der Vergleichsprozess zwischen den Monitoringdaten und dem Planmodell endet mit dem Verweis darauf, diesen Abschnitt nach Anpassung des Planmodells erneut zu prüfen.

Die beiden beschriebenen Prozesse der Informationsaggregation bilden vor dem Hintergrund der detaillierten Modell- und Statusprüfungen die in Abbildung 6-2 dargestellte *Interpretation und Konformitätsprüfung des Datenmodells aus der Bauwerkssensorik* nach dem Bauwerksmonitoring. Die Einbeziehung der Informationen aus dem PII erfolgt durch die Einbindung des Planmodells sowie der zeitlichen Informationen aus dem Bauablaufplan. Darüber hinaus ist das Wissen der bearbeitenden Personen hinzuzuziehen, wodurch eine zusätzliche Expertise in die Konformitätsprüfung eingebracht wird. Vor dem Hintergrund der Automatisierung stellt dieser Verlauf jedoch eine Verzögerung dar.

Durch die Einbindung der Monitoring-Informationen und die Überprüfung der Konformität des Planmodells in Form des PII durch Expertisewissen wird das Modell in den Status des PSK überführt. Der Status des PSI aus der Definition in Kapitel 5.3 wird somit übersprungen, da keine automatisierte Übernahme der Monitoring-Daten in das Modell ohne Betrachtung eines Projektbeteiligten erfolgen kann. Aus dem Status des PSK wird am Ende des Projektes das endgültige Modell zentral archiviert. Je nach Umfang der Änderungen und deren Häufigkeit wird die Anzahl der Überführungen des aktuellen Modellstands in die Archivierung geregelt. Nach Ansicht des Verfassers dieser Arbeit wird es als nicht sinnvoll erachtet, jeden Stand der Planung sowie jede auf der Baustelle festgestellte Abweichung für zukünftige Projekte vorzuhalten. Wichtiger sind hingegen eklatante Unterschiede, die im Design- oder im Planungsprozess auftreten und eine umfangreiche Änderung hervorrufen. Darüber hinaus sind diejenigen Elemente resp. Auswirkungen in die Planung zukünftiger Projekte einzubeziehen, die auf den Baustellen aufgrund unbekannter Rahmenbedingungen oder Einwirkungen auftreten und im Zuge von Nachträgen an den Auftraggeber gemeldet werden.

Am Ende des Prozesses der Informationsaggregation der Daten aus dem Bauwerksmonitoring stellen die beiden beschriebenen Wege der Einbringung der Leistungsinformationen in den Digitalen Schatten in sich abgeschlossene Prozesse dar. Bei beiden Prozessen ist der Umgang mit Abweichungen selbstständig geregelt. Verlaufen diese Prozesse ohne Abweichungen oder werden diese so behandelt, sodass eine Fortsetzung der Informationsaggregation notwendig wird, so werden die Modelldaten innerhalb des Digitalen Schattens für die Verwendung in der AVA-Software aufbereitet und exportiert. Diesbezüglich wird ein offenes Austauschformat gewählt, sodass eine Einbindung in alle gängigen Softwarelösungen und ebenso möglichst weitreichende Einbindung in unterschiedliche Unternehmensprozesse sichergestellt werden kann.

Einbindung der Leistungs- und Rechnungsübersichten

Im Zuge dieses Ablaufs wird die Sphäre des Digitalen Schattens gemäß Abbildung 6-2 verlassen und es wird in den Bereich der AVA-Software als Teil der Digital Twin Construction eingestiegen (vgl. Abbildung 6-18). Dieser Bereich als Auszug aus Abbildung 6-2 ist bis dato nicht auf der zentralen Plattform umgesetzt. Jedoch gibt es aktuell beim Praxispartner Entwicklungen, in der diese Umsetzung angestrebt wird. Da diesbezüglich jedoch kein praktikabler Weg vorliegt, wird sich innerhalb des Realisierbarkeitstests auf das bewährte System bezogen.

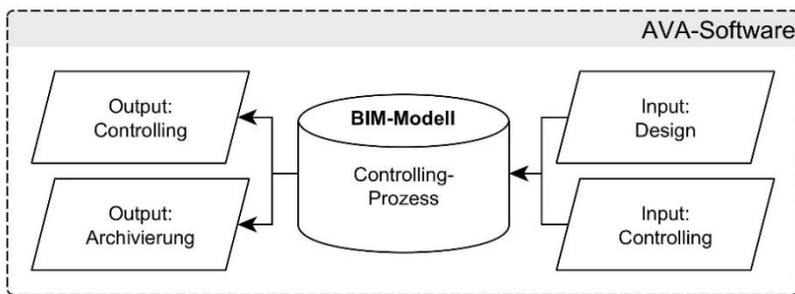


Abbildung 6-18: Die AVA-Software als Teil der DTC³⁴²

Innerhalb dieses Systems verläuft die Verwendung modellbasierter Informationen im Zuge des Bauprojekt-Controllings teils ohne automatische Datenverbindung und wird daher als separat angesehen. Die Modelldaten werden jeweils als *Input: Design* sowie als *Input: Controlling* aus dem PII sowie dem PSK aktualisiert. Da die Plattform des Digitalen Schattens durch den Export verlassen wurde, wird das Modell im folgenden Zustand als BIM-Modell bezeichnet, da nur diese Art eines Digitalen Abbilds innerhalb der AVA-Software verwendet werden kann.

Sofern zu Projektbeginn eine Zuweisung von elementspezifischen Attributen zu entsprechenden Positionen innerhalb des Prozesses des Bauprojekt-Controllings erfolgt ist und diese zuweisungsspezifischen Bezeichnungen konstant in der Projektarbeit eingehalten werden, so wird bei den nachfolgenden Aktualisierungen stets eine automatisierte Zuweisung ermöglicht. Infolgedessen ist der Controlling-Prozess an alle Bereiche der Projektarbeit angeschlossen. Im Zuge der turnusmäßigen Leistungs- und Abrechnungsprozesse wird der jeweils aktuelle Stand der Modellinformationen wiederum exportiert und dem PSK zugeführt. Nach Abschluss des Projekts werden die Daten einmalig in die Archivierung überführt. Der Archivierungsprozess wird zu einem späteren Zeitpunkt innerhalb des Realisierbarkeitstests näher erläutert.

Im Sinne einer zeitnahen sowie möglichst kontinuierlichen Durchführungs- oder Dispositionssteuerung wird der in Abbildung 6-19 dargestellte Prozesse zur Generierung von Leistungs- und Rechnungsübersichten betrachtet. Dieser Prozess erfolgt in der Ausschreibungs-, Vergabe- und Abrechnungssoftware und basiert auf den Grundlagen des Umfelds der Projektinformationen

³⁴² Eigene Darstellung

aus der Arbeitskalkulation, die wiederum aus der Angebotskalkulation gemäß Abbildung 6-5: Prozess: Vorbereitende Maßnahmen für die modellbasierte Angebotskalkulation überführt wurden.

Wie anfangs angemerkt, werden nachfolgend die Generierung der Leistungs- und der Rechnungsmengen als repräsentative Prozesse für die Dispositions- sowie die Durchführungssteuerung des Bauprojekt-Controllings betrachtet. Eine Betrachtung des an die Ermittlung der Leistungsmengen angeschlossenen Kosten-Soll-Ist-Vergleiches wird nicht vorgenommen, da dieser innerhalb des Realisierbarkeitstests aufgrund von Auftraggebervorgaben nicht in eine zeitnahe Umsetzung einbezogen werden kann.

Nach dem Start dieses Prozesses erfolgt die Aktualisierung der Modell- sowie der Bauablaufinformationen aus dem Monitoring-Prozess in einer solchen Häufigkeit, in der sich Änderungen in den entsprechenden Prozessen ergeben. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass der Controlling-Prozess auf eine manuelle Einbindung eben dieser Daten angewiesen ist. Je häufiger somit eine Rückmeldung aus den Monitoring-Prozessen der Baustelle vorliegen, desto häufiger werden die dort exportierten Daten in den Controlling-Prozess eingebunden. Das bedeutet, dass eine Aktualisierung in Quasi-Echtzeit möglich wäre, jedoch innerhalb des Realisierbarkeitstests nicht umgesetzt wurde.

Nach der manuellen Einbindung der jeweiligen Daten werden diese ebenfalls manuell auf Korrektheit überprüft. Es stehen grundsätzlich Überprüfungsalgorithmen zur Verfügung, diese müssen allerdings manuell gestartet werden. Sie verlaufen anschließend automatisiert.

Im Anschluss an die Prüfung auf Konformität werden die Informationen in die Projektumgebung der Software übertragen. Alle dem Modell zugeordneten Mengen, Zeiten und Kosten werden auf Basis der neuen Informationen automatisiert aktualisiert. Die Zuordnung der Modellelemente zu den entsprechenden Berichts- oder Abrechnungszeiträumen erfolgt durch die Separierung anhand der im Monitoring-Prozess automatisiert zugewiesenen Ist-Zustände des jeweiligen Erstellungs- resp. Soll-Abrechnungszeitraums des Bauablaufplans. Es sei darauf hingewiesen, dass die Leistungs- sowie die Rechnungsmengen direkt aus den Modelldaten abgeleitet werden, es findet keine weitere händische Ermittlung statt. Dies ist in der Fallstudie möglich, da im Zuge des Realisierbarkeitstests lediglich eine gewisse Auswahl an Elementen betrachtet wird. Eine umfangreiche Betrachtung aller im Leistungsverzeichnis vorhandenen Elemente ist zum aktuellen Zeitpunkt nicht möglich, da für eine derartige Aufgabenstellung das Konstrukt des Leistungsverzeichnisses vor dem Hintergrund eines modellbasierten Mengenbezugs grundlegend angepasst werden müsste. Zum aktuellen Zeitpunkt besteht in einem Großteil der Projektleistungsverzeichnisse nur eine geringe Objektorientierung, sodass wiederum bei den Mengen einer Vielzahl an Positionen des LV keine Ableitung aus dem Modell erfolgen kann. Unabhängig davon erfolgt die Zuweisung derjenigen Elemente, bei denen eine Zuweisung zu den Positionen des Leistungsverzeichnisses möglich ist, teilautomatisiert nach einem manuellen Startvorgang. Zu Projektbeginn sind diesbezüglich einmalig entsprechende Berichts- und Abrechnungszeiträume zu erstellen.

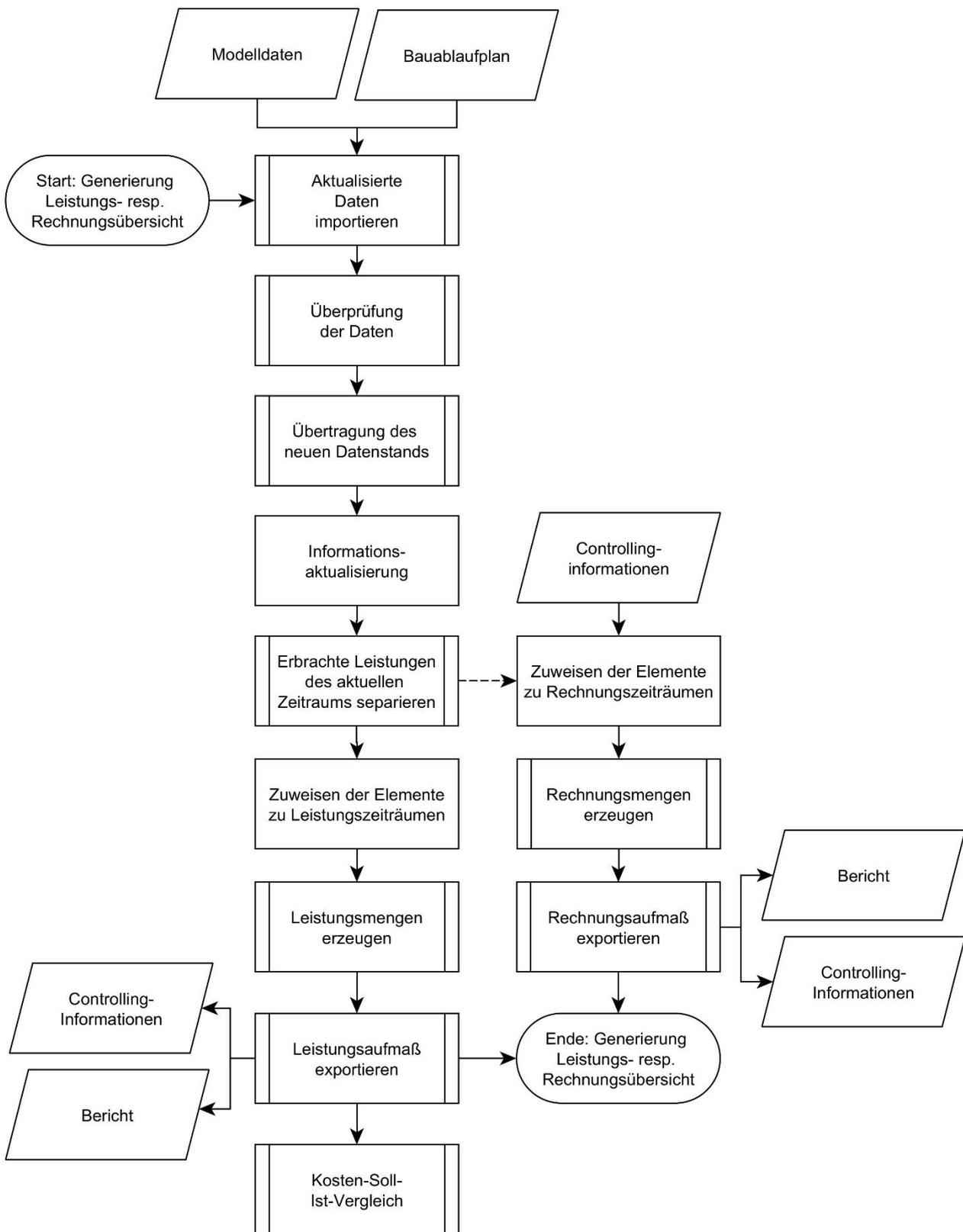


Abbildung 6-19: Prozess: Generierung modellbasierter Leistungs- resp. Rechnungsmengen³⁴³

³⁴³ Eigene Darstellung

Im Allgemeinen steht einer ganzheitlichen Automatisierung aktuell die Tatsache entgegen, dass Abrechnungen teils aus strategischen, teils aus organisatorischen Gründen häufig in unterschiedlichen Zeiträumen erfolgen und der Prozess somit von den Voraussetzungen einer Standardisierung abweicht. Es kommt infolgedessen mitunter zu Einschränkungen in der Automatisierung der Projektbearbeitung.

Im Zuge der Arbeitskalkulation werden die Leistungsmengen innerhalb der Modelldaten separiert, um nur diejenigen Elemente zu erfassen, die im entsprechenden Zeitraum gemeldet werden sollen. Diese Arbeit erfolgt meist durch die Bauleitung. Nach Herstellen des Bezugs der Modellinformationen zu den jeweiligen Berichtszeiträumen werden die Leistungsmengen erzeugt und innerhalb des Leistungsaufmaßes gespeichert. Für die im Anschluss stattfindende Meldung der Leistungen wird der entsprechende Bereich der Software dazu verwendet, das Aufmaß der Leistungen im gewählten Zeitraum zu exportieren. Die Daten werden in einem datenbankähnlichen Datenformat als *Controlling-Informationen* exportiert und innerhalb des Digitalen Zwillings beim Einlesen gemäß Abbildung 6-6: Prozess: Modellaktualisierung S.141 als *Neue Controlling-Informationen* verwendet. Die Informationen werden den Modellelementen als externe Datenquelle mittels der GUID als Primary Key zugeordnet und entsprechend transferiert. Die Leistungsmengen können durch die Projektleitung in der grafischen Benutzungsoberfläche betrachtet und geprüft werden. Darüber hinaus besteht auf Basis der gemeinsamen Plattform die Möglichkeit, dass die Bauüberwachung oder die Bauherrenvertretung ebenfalls Zugriff auf diese Benutzungsoberfläche erhält. Grundsätzlich ist bei einer solchen Vorgehensweise ein Höchstmaß an Transparenz gegeben, dessen sich alle Projektpartner bewusst sein müssen. Ist ein solcher Ablauf hingegen etabliert, kann das Vertrauen innerhalb der Vertragspartner erhöht werden.

Sind die Leistungen gemeldet, so können diese mit den Plan-Kosten multipliziert und somit als Soll-Kosten in den Kosten-Soll-Ist-Vergleich eingehen. Dieser Vergleich wird in der vorliegenden Arbeit nicht untersucht, da er einerseits nicht zeitnah erfolgt und somit zeitlich aus dem Betrachtungsrahmen fällt, andererseits für eine Automatisierung ebenfalls eine automatisierte Erfassung der Ist-Kosten notwendig ist. In beiden Projekten erfolgt jedoch die Erfassung der Ist-Kosten zu einem großen Anteil durch manuelle Prozesse. Diese würden die Prozessdauer im Betrachtungsbereich erheblich verzögern.

Im Zuge des Abrechnungsprozesses wird ein der Leistungsmeldung ähnlicher Ablauf verwendet. Der entsprechende Bereich innerhalb der AVA-Software wird dafür verwendet, das Aufmaß der abrechnungsbezogenen Elemente zu generieren und zu exportieren. Im konventionellen Projektverlauf großer Projekte erfolgt die Ermittlung der Rechnungsmengen durch einen sog. Cost-Controller resp. eine kaufmännisch mitarbeitende Person, die die Mengen zu den Positionen des Leistungsverzeichnisses zuordnet. In der vorliegenden Fallstudie werden die Rechnungsmengen aus den Modelldaten durch Separierung des entsprechenden Zeitraums abgeleitet. Um eine gewisse unabhängige Prüfung zu ermöglichen, sollten die entsprechenden separierten Mengen stichprobenartig durch die kaufmännischen Mitarbeitenden mit den Mengen aus der grafischen Benutzungsoberfläche verglichen werden.

Diese Art des modellbasierten Aufmaßes entspricht bis dato weder im deutschsprachigen noch im internationalen Raum einer gängigen Norm. Daher ist ein Austausch mit Nachunternehmern oder Bauherren nur dann möglich, wenn dieselbe Software als Grundlage verwendet wird oder die Schnittstelle durch eine eigens generierte Software bedient werden kann. In vorliegender Fallstudie konnte der Austausch mit dem Bauherrn beispielhaft und erfolgreich umgesetzt werden. Grundlegend sollte der Zugriff aller Projektbeteiligten auf die grafische Benutzungsoberfläche erlaubt werden, um eine durchgehende stichprobenartige Prüfung der Mengenermittlung durch die Bauüberwachung oder die Bauherrenvertretung zu ermöglichen und somit das Vertrauen zu stärken.

Sind die Rechnungsmengen erzeugt, so können diese innerhalb eines Rechnungsaufmaßes exportiert werden. Einerseits wird ein Bericht erzeugt, der als Nachweis gegenüber Dritten gelten kann. Darüber hinaus werden die Daten je nach Anwendungsfall in die grafische Benutzungsoberfläche übertragen, sodass sie zeitnah von der Projektleitung oder der Bauüberwachung geprüft werden können.

Die Verwendung der Daten für die Rechnungsgenerierung erfolgt in der vorliegenden Fallstudie konventionell und wird daher nicht näher erläutert. In dieser Konsequenz endet der Prozess der Generierung der Leistungs- resp. Rechnungsübersichten. Im Projektbetrieb erfolgt am Ende der Rechnungsstellung ein weiterer Vergleich aktueller Kennwerte mit Soll-Daten wie bspw. der Vergleich des Termin-Solls mit dem Bauablaufplan oder den bisher verwendeten Ausführungsmengen mit den Planmengen. Dies wird in der vorliegenden Fallstudie aufgrund des großen Umfangs hingegen nicht betrachtet.

Visuelle Darstellung des Projektstatus mittels grafischer Benutzungsoberfläche

Für eine adäquate Übersicht über die wichtigsten Informationen des Projektgeschehens wird der *Output: Status* aus dem PSK gemäß Abbildung 6-2 mit dem *Output: Status* aus dem PII vereint. Sie gehen als *Input: Status* in den Bereich der visuellen Darstellung in Form einer grafischen Benutzungsoberfläche im Sinne eines Dashboards ein. Der Input-Output-Bereich des Dashboards als Verwendungsort für Bauwerksmodellldaten ist in Abbildung 6-20 als Auszug aus Abbildung 6-2 dargestellt. Die Modellinformationen, die in der Cloud-Lösung vorgehalten werden, spiegeln den Stand der Bauwerksmodellinformationen im Zustand PSK aus dem Digitalen Schatten wider. Dazu wird der jeweilige *Output: Status* des zentralen Modells sowie der *Output: Controlling* aus dem aktuellen Stand des Bauprojekt-Controllings innerhalb der AVA-Software als jeweiliger Input innerhalb der *Cloud-Lösung Dashboard* verwendet. Auf diese Weise wird eine zeitnahe und stets aktuelle Darstellung der tatsächlichen Leistungen erreicht, worin zusätzlich die zukünftigen Leistungen mit ihren jeweiligen as-planned-Informationen enthalten sind. Diesbezüglich wird die Durchführungssteuerung in Echtzeit innerhalb der Fallstudie nicht mittels Aktorik, sondern durch die Projektleitung ermöglicht, die wiederum die Modelldaten verwendet, um die Baustelle zu steuern.

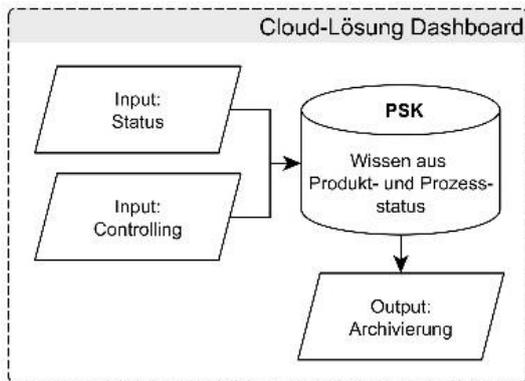


Abbildung 6-20: Die grafische Benutzeroberfläche als Teil der DTC³⁴⁴

Eine solche Art der Projektübersicht ermöglicht eine automatisierte und folglich kontinuierliche Aufbereitung von Informationen, die von der Projektleitung resp. dem Management als diejenigen wichtigen Informationen eingestuft wurden, die genutzt werden können, um ad hoc den aktuellen Projektstatus resp. das aktuelle Baustellengeschehen näherungsweise einschätzen zu können. Funktionalitäten von Softwarelösungen dieser Art bieten einen weitreichenden Umfang. Dabei darf jedoch aufgrund der großen Möglichkeiten die Kernthematik nicht aus den Augen verloren werden, sodass grundsätzlich nur diejenigen Informationen dargestellt werden sollten, die der Projektleitung in einer gewissen Zeitspanne weiterhelfen. In einem gewissen Turnus sollte die Ansicht des jeweiligen Dashboards entsprechend überarbeitet resp. erweitert werden.

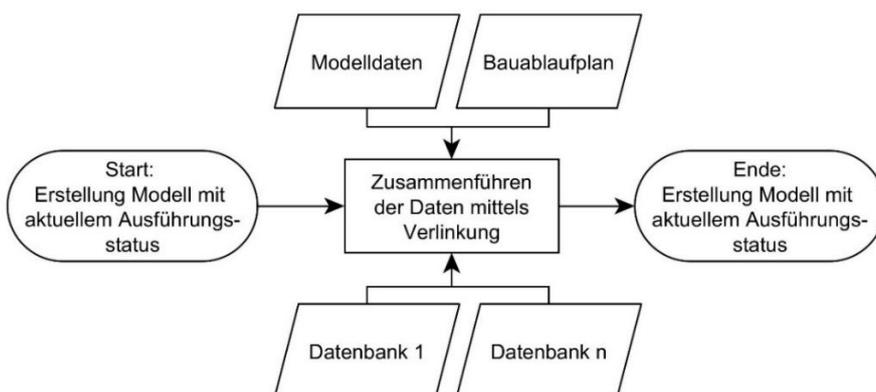


Abbildung 6-21: Prozess: Generierung der grafischen Benutzeroberfläche³⁴⁵

Im Kontext des Projektverlaufs erfolgt die Erstgenerierung der *Cloud-Lösung Dashboard* zu demjenigen Zeitpunkt, zu dem der Digitale Schatten auf der zentralen Koordinationssoftware aufgesetzt wird. Der in Abbildung 6-21 dargestellte Prozess zeigt diesbezüglich die Generierung

³⁴⁴ Eigene Darstellung

³⁴⁵ Eigene Darstellung

mit unterschiedlichen Datenquellen auf. Zu Anfangs werden die Modellinformationen im Zustand des PII verwendet, da vor Baubeginn noch keine Ausführungsinformationen vorhanden sind. Nachdem die Informationen innerhalb des Bauwerksmonitoring erfasst, aufbereitet und so interpretiert sind, dass das Bauwerksinformationsmodell den Zustand PSK erreicht, werden ebenso dessen Informationen in Form des *Output: Status* in das Dashboard verknüpft.

Die grundlegenden Informationen des virtuellen und des physischen Teils des Bauwerks werden innerhalb des Digitalen Schattens vor- und dort jeweils aktuell gehalten. Diese zentrale Informationsquelle wird zur Verknüpfung der Dashboard-Lösung eingesetzt und ermöglicht folglich eine automatisierte Aktualisierung der Modelldaten in Quasi-Echtzeit. Darüber hinaus werden die Informationen aus dem Bauablaufplan sowie weiteren Datenquellen möglichst in Form von Datenbanken eingebunden. Die Verknüpfung der unterschiedlichen Datenquellen untereinander basiert auf einer direkten Verlinkung von einzelnen Datensätzen innerhalb der jeweiligen Datenbank. Diese Datensätze müssen zwingend in Semantik und Syntax übereinstimmen. Nähere Informationen zur Verknüpfung von Datenbanken können entsprechender Literatur entnommen werden.

In der vorliegenden Fallstudie werden die Modelldaten mit unterschiedlichen Datenbanken verknüpft. Einer der Stände des Dashboards für das Brückenbauwerk ist in Abbildung 6-22 dargestellt.

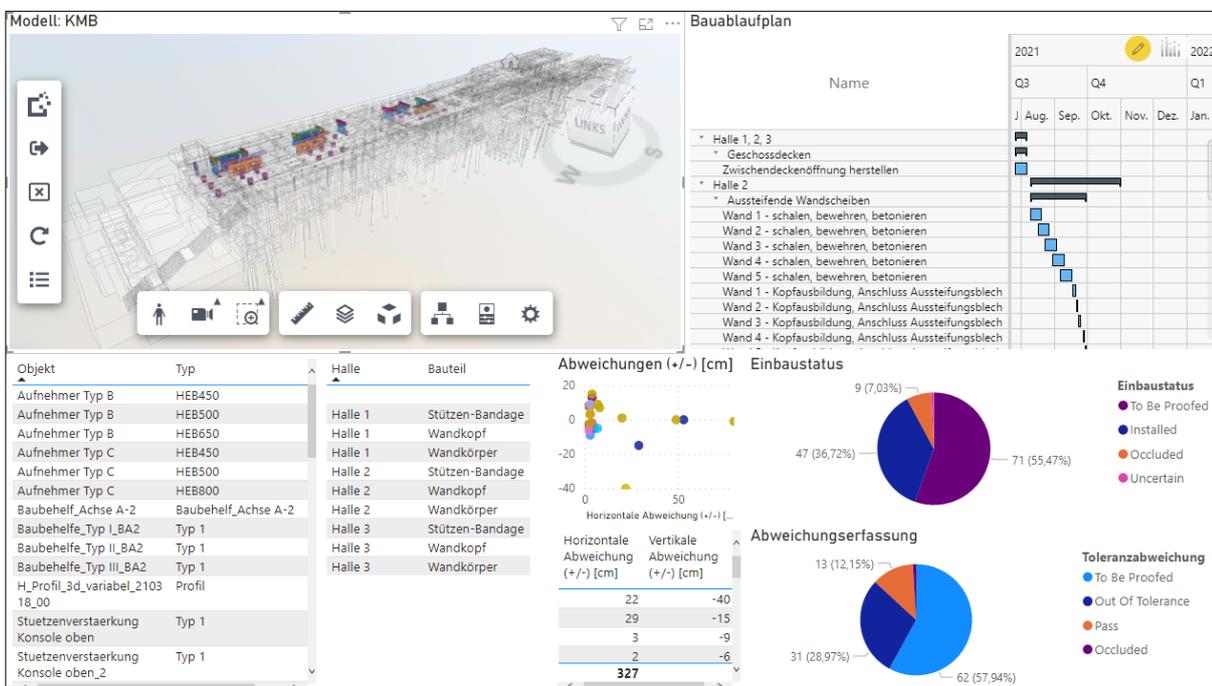


Abbildung 6-22: Dashboard: Übersicht KMB³⁴⁶

Da im Falle dieses Bauwerks der Fokus auf dem Bauwerksmonitoring in Echtzeit als Durchführungssteuerung liegt, wird dem Modell innerhalb des Dashboards zuerst der Bauablaufplan zugewiesen. Darin sind die Vorgänge des zu prüfenden Sammelvorgangs inkl. des jeweiligen Start- und Endzeitpunktes enthalten. Durch die direkte Verbindung zu den Modelldaten kann eine Visualisierung jedes Elementes inkl. des zugehörigen Vorgangs erfolgen. Neben dem Bauablaufplan ist eine Datenbank mit den für die Anforderungen des Bauwerksmonitorings der ausstehenden Elemente notwendigen Informationen zugewiesen. Darin enthalten sind unter anderem die Beschreibung der Bauwerksteile, bezogen auf das jeweilige Bauwerk, ihre Bauteilbezeichnung, die zugeordneten Bauphasen, aktuell wissenswerte Massen resp. Mengen, für den Einbau von Rahmenträgern notwendig Abmessungen und Informationen aus dem Bauwerksmonitoring.

Der Fokus der Durchführungssteuerung in diesem Teil der Fallstudie wird auf die Auswertung der Informationen aus dem automatisierten Bauwerksmonitoring gelegt. Diesbezüglich sind in Abbildung 6-22 die Objekt- und Typbezeichnungen der einzelnen Elemente dargestellt, welche für eine eindeutige Identifizierung notwendig sind. Darüber hinaus sind der Bauablaufplan mit den jeweiligen Vorgängen sowie die Informationen bzgl. des Einbaustatus der betrachteten Bauwerksteile der zugehörigen Abweichungsanalyse und den errechneten Abweichungen dargestellt. Diese Informationen resultieren aus den Prozessen des automatischen Vergleichs der mittels terrestrischem Laserscan erfassten Punktwolke und dem Planmodell gemäß Abbildung 6-17: Abweichungen beim Vergleiche der Punktwolke mit dem Planmodell. Diese Art der Darstellung ermöglicht eine eindeutige Kennzeichnung jedes überprüften Elementes sowie des zugehörigen Status und der Abweichung.

Als Auszug für eine Beschreibung wird das im Zuge des Modell-Punktwolke-Vergleichs dargestellte Element der Korsettierung resp. der Bandagierung einer Tragwerksstütze herangezogen, auf deren Konsolen im Verlaufe der Sanierung HE-Träger aufgelegt werden sollen. Wie in Abbildung 6-23 dargestellt, wird das entsprechende Element im Sichtfenster der visuellen Darstellung separiert und markiert. Der jeweils zugehörige Vorgang innerhalb des Bauablaufplans wird ebenso wie die Objekt- resp. Typbezeichnung des Elements separiert. Innerhalb des Einbaustatus sowie der Abweichungserfassung und in Form der tabellarischen Darstellung werden die zugehörigen Informationen hervorgehoben. Die Abweichungen liegen innerhalb der Toleranz, das Bauteil trägt somit den Status „Pass“ (zu deutsch: bestanden) und erhält den Status „Installed“ (zu deutsch: eingebaut).

Die beschriebene Übersicht ist innerhalb des Bauprojekt-Controllings beschränkt. Sie stellt die Sphäre der Bauwerksüberwachung und nur die aktuell wichtigsten Informationen dar. Eine Einbindung von Daten aus der Arbeitskalkulation erfolgt nicht.

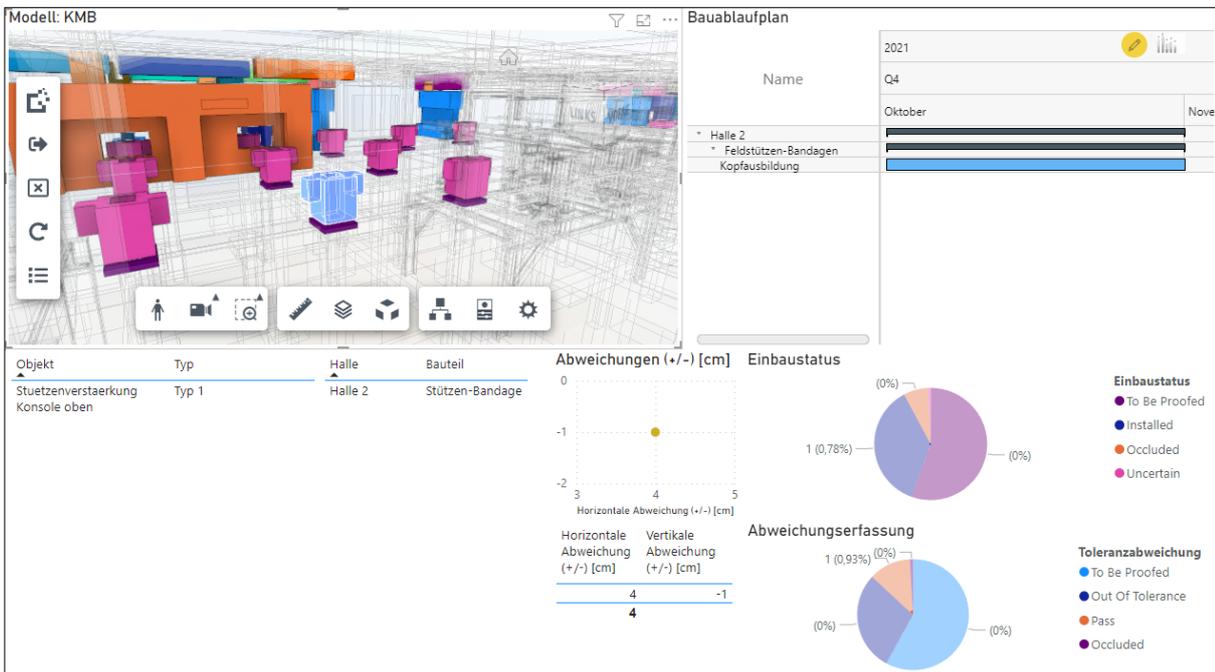


Abbildung 6-23: Dashboard: Darstellung der Abweichung einer Stuetzenverstaerkung³⁴⁷

Im zweiten Teil der Fallstudie wird für die Durchführungssteuerung beim Projekt LSW Flörsheim ebenfalls eine grafische Benutzungsoberfläche gemäß Abbildung 6-24 herangezogen.

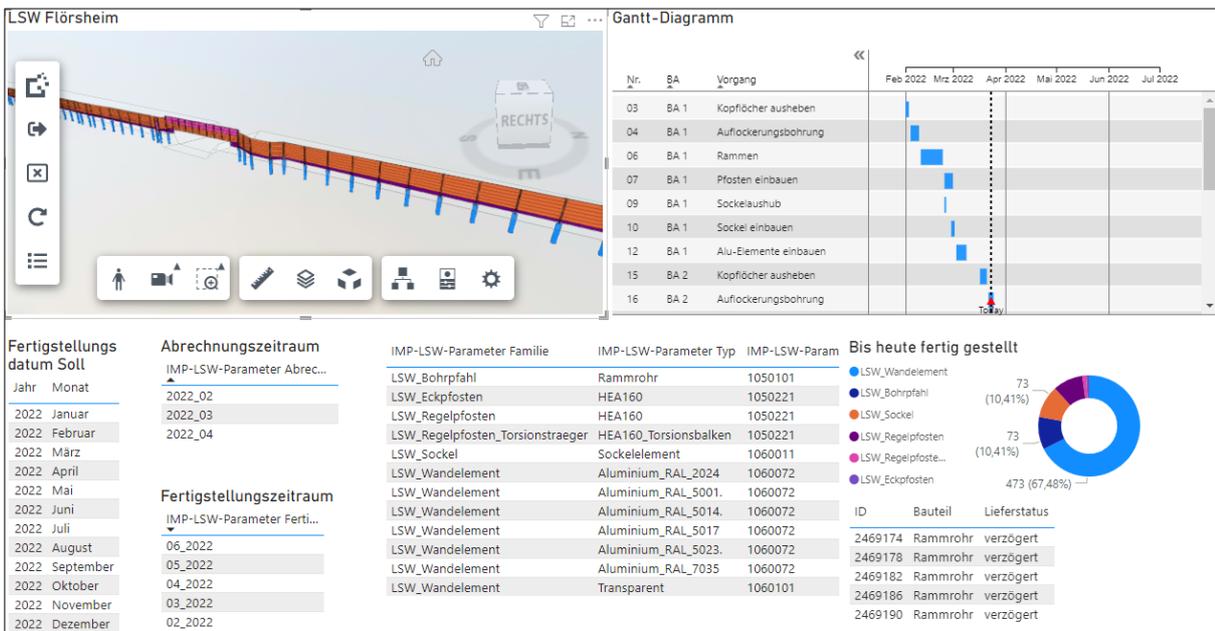


Abbildung 6-24: Dashboard: Übersicht LSW Flörsheim³⁴⁸

³⁴⁷ Eigene Darstellung

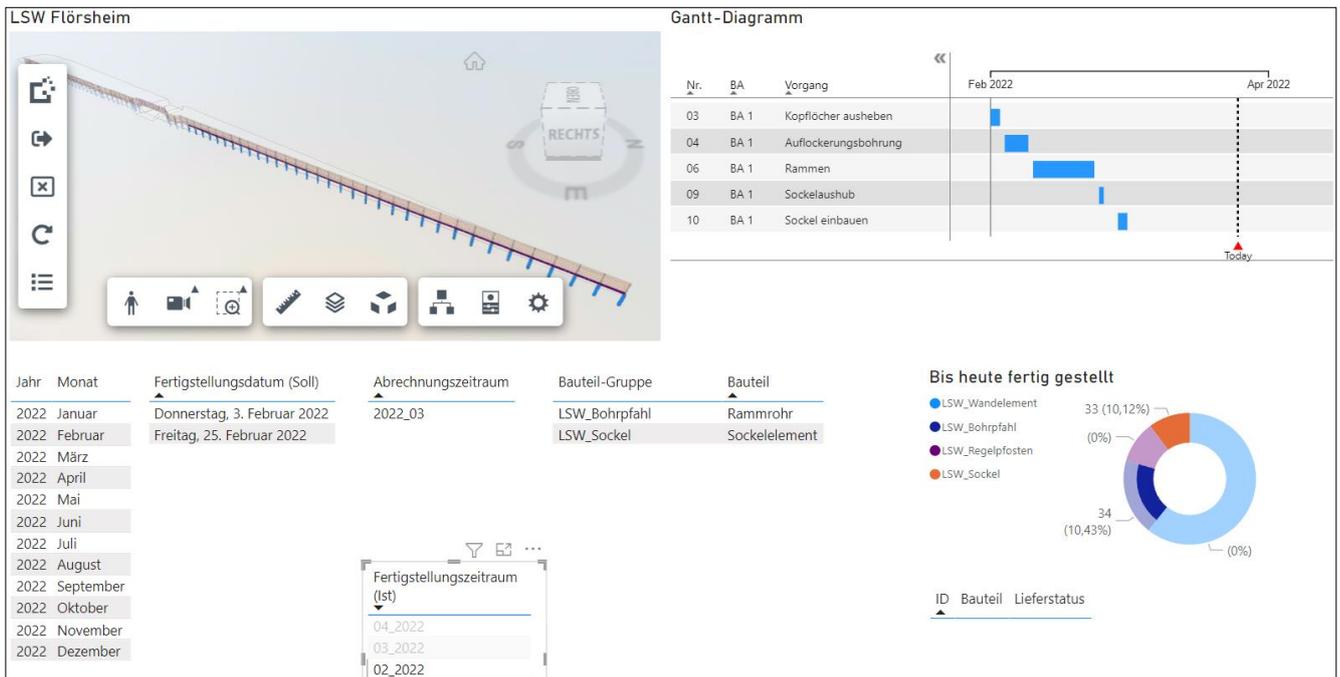
³⁴⁸ Eigene Darstellung

Diese Übersicht stellt äquivalent zum Brückenbauprojekt eine Verbindung der Modelldaten zu Datenbanken aus unterschiedlichen Quellen her. In diesem Fall wird ebenfalls der Bauablaufplan in die Übersicht einbezogen, um das jeweilige Soll-Erstellungsdatum der Elemente darzustellen. Darüber hinaus wird entgegen der vorherigen Beschreibung des ersten Projektes auf Informationen aus der Arbeitskalkulation zurückgegriffen. Sie werden zyklisch innerhalb der Projektbearbeitung aktualisiert und somit in die grafische Oberfläche eingebunden. Konkret werden Daten aus dem Bereich der Leistungs- und Rechnungsmengen dargestellt. Es besteht folglich eine monodirektional automatische Verbindung der auf Seite 161 beschriebenen Informationsauszüge aus den Leistungs- und Rechnungsmengen mit dem Dashboard. In der vorab beschriebenen Übertragung der Modellinformationen mittels Exports in die AVA-Software sind neben den Mengen der jeweiligen Elemente ebenso die sog. Element-IDs enthalten. Diese eindeutigen Identifikationsnummern ermöglichen in dem aktuell betrachteten Prozess die Verknüpfung des Status des jeweiligen Elements zu den Leistungs- und Rechnungsinformationen. Diese werden wiederum mittels derjenigen Informationen dargestellt, die angeben, ob und wann die Fertigstellung einzelner Bauteile gemeldet wurde oder ob diese Elemente bereits der Abrechnung zugeführt wurden.

Zusätzlich werden Informationen aus dem Bereich der Anlieferung auf der Baustelle einbezogen. Die Bauleitung vor Ort trägt im üblichen Vorgehen die jeweilige Lieferung von Bauteilen oder Elementen in einer Datenbank ein. Für die Fallstudie wird ein erhöhter Aufwand betrieben, indem die Lieferung detaillierter betrachtet wird und jedes Element entsprechend seiner eindeutigen Kennzeichnung in diese Datenbank mit Lieferungszeitpunkt eingetragen wird. Es ist möglich von Seiten der jeweiligen Hersteller die im Planungsprozess generierte Element-ID eines jeden Elementes in die jeweilige Lieferung und den zugehörigen Strichcode einzupflegen, sodass die Erfassung der Lieferung auf der Baustelle und der entsprechenden Datenbank automatisiert erfolgen kann. In der vorliegenden Fallstudie konnte dieser Prozess noch nicht umgesetzt werden. Für zukünftige Projekte werden bereits Gespräche mit Herstellern resp. Lieferanten bzgl. einer Umsetzung geführt.

Äquivalent zur vorherigen wird ebenso bei dieser Darstellung des Projektes ein plakativer Auszug aus der Verwendung des Dashboards gewählt und in Abbildung 6-25 dargestellt. In der Übersicht wird die Verzögerung der Lieferung einzelner Elemente ersichtlich. Nach der Auswahl eines der Elemente kann der Soll-Einbauzeitraum sowie der zugehörige Vorgang innerhalb des Bauablaufplans identifiziert werden. Durch die Betrachtung des kritischen Weges können Maßnahmen entschieden und eingeleitet werden.

Eine andere Anwendungsmöglichkeit ist die Separierung derjenigen Elemente, die über das Projekt-Controlling bereits fertiggestellt oder abgerechnet worden sind. Nach der Auswahl eines Fertigstellungszeitraumes werden diejenigen Elemente separiert, die diesem Zeitraum zugeordnet sind (vgl. Abbildung 6-25). Dabei wird das jeweilige Soll-Fertigstellungsdatum sowie ein möglicher Abrechnungszeitraum dargestellt, sofern die Elemente bereits abgerechnet werden konnten. Infolgedessen kann die Projektleitung zeitnah erkennen, welche Elemente unter anderem verzögert, gemeldet oder abgerechnet sind.

Abbildung 6-25: Dashboard: Darstellung des Abrechnungszustandes³⁴⁹

Die für die Verwendung innerhalb einer zeitnahen Durchführungssteuerung notwendige Aktualität der Daten in den jeweiligen Dashboards der einzelnen Projekte ist stets gegeben und spiegelt den jeweils aktuellen Zustand des PSK wider. Es wird daher am Ende eines jeden Projektes nur einzig ein Export des aktuellen Zustands benötigt, um sie in die Archivierung zu überführen.

Neigen sich einzelne Bauprozesse oder ganze Gewerke dem Ende zu, werden die Daten innerhalb des Digitalen Schattens für die Betriebsphase vorbereitet. Dazu ist es notwendig, weiterführende Datenquellen einzubinden oder dem DS als Speichermedium Informationen hinzuzufügen. Der Digitale Schatten wird im Zustand des PSK über die Bauphase hinaus als primäre Informationsquelle für Informationen des Betriebs genutzt. Nicht nur Cyber-Physische Systeme wie Sensoren oder Aktoren können eingebunden werden, sondern auch einzelne Dokumente wie bspw. technische Datenblätter von Elementen der Technischen Gebäudeausrüstung oder Liefer- resp. Einbauinformationen aus der Bauphase.

In der Fallstudie werden diesbezüglich unterschiedliche Datenblätter in die einzelnen Elemente des DS eingebunden. Ablageort ist der Remote Desktop und somit derselbe Ort, an dem die Modellinformationen sowie alle weiteren Informationen des Digitalen Schattens vorgehalten werden. Während des Ablagevorgangs erhalten die einzelnen Dokumente jeweils einen dokumentenspezifischen Pfad in der entsprechenden Speicherumgebung. Dieser Pfad wird den einzelnen Elementen innerhalb des DS als sog. Hyperlink zugeordnet. Dadurch wird es ermöglicht, das gewünschte Element über diesen hinterlegten Hyperlink im DS zu verwenden. Als Beispiel wird eine Stahlstütze der korsettierten Stütze herangezogen. Abbildung 6-26 zeigte dieses visuelle

³⁴⁹ Eigene Darstellung

Modellübersicht des Digitalen Schattens mit dem separierten Element. Nach der Auswahl wird das zugehörige Dokument ebenfalls in der grafischen Benutzeroberfläche angezeigt.



Abbildung 6-26: Dashboard: Darstellung der Stahlliste³⁵⁰

Der Prozess der Informationszuordnung wird überwiegend manuell durchgeführt. Für eine umfangreichere Automatisierung innerhalb dieses Prozesses werden bereits umfangreichere Funktionalitäten in der Dokumentenablage während der Bauphase benötigt. An dieser Stelle sei angemerkt, dass auf dem Softwaremarkt bereits Möglichkeiten existieren, um eine solche Zuweisung mittels sogenannter Metadaten zu erreichen. In der vorliegenden Fallstudie wurde dies jedoch nicht verwendet. Für weiterführende Informationen zu Metadaten in Dokumentenmanagementsoftware ist entsprechende Literatur heranzuziehen.

Archivierung

Der Prozess der Archivierung ist entgegen vieler der anderen verwendeten Prozesse kurz und überschaubar. Gemäß Abbildung 6-27 werden Informationen als *Input: Archivierung* in das Digitale Abbild aus dem abgeschlossenen Bauprozess überführt.

³⁵⁰ Eigene Darstellung

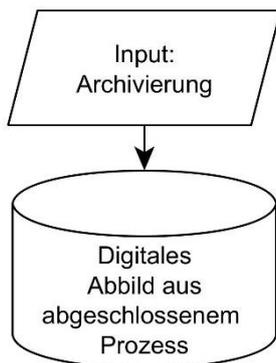


Abbildung 6-27: Die Archivierung als Teil der DTC³⁵¹

Die Menge der zu überführenden Informationen ist bereits während der Projektbearbeitung abzuwägen. Eine sinnvolle Menge gestaltet sich aus einer Betrachtung der im Projekt umgesetzten Nachträge resp. der diesbezüglich entgegen dem Planungsstand aufgetretenen Änderungen innerhalb des Projektverlaufs. Darüber hinaus sind mögliche Analyseergebnisse bspw. aus einer Vorkopplung einzubeziehen, wonach bemerkenswerte Resultate eine maßgebende Entscheidungsänderung der Projektleitung hervorbringen könnten. Weiteres

Die Archivierung stellt das letzte Glied der Prozesse in der Realisierbarkeitsstudie dar. Daher wird nachfolgend auf die Bewertung der Automatisierungsgrade der einzelnen Prozesse eingegangen.

³⁵¹ Teilausschnitt aus Abbildung 6-2

6.6. Bewertung

Die durchlaufenen Prozesse in der Fallstudie lassen einen Automatisierungsgrad sehr unterschiedlicher Ausprägung erkennen. Tabelle 2 stellt diesbezüglich die Auflistung der Bewertung der einzelnen Prozesse dar und gibt die jeweilige Stufe sowie den entsprechenden Automatisierungsgrad an.

Tabelle 2: Bewertungsmatrix

Prüfprozess	Bezeichnung	Automatisierungsgrad	Stufe	Gewichtung	Wertigkeit
PP01	Vorbereitende Maßnahmen im Controlling-Prozess für die modellbasierte Angebotskalkulation	gering	1	1	1
PP02	Aktualisierung des Digitalen Schattens auf Basis geänderter Planungsstände	mittel	3	3	9
PP03	Vergleich unterschiedlicher Modellstände	hoch	5	3	15
PP04	Modellbasierte Absteckung und Erfassung	mittel	3	2	6
PP05	Baustellenbezogene Prozesse zur Erfassung des Leistungsstandes	mittel	4	3	12
PP06	Abgleich der Monitoringdaten mit dem Planungsstand	hoch	5	4	20
PP07	Einbinden der Leistungs- und Rechnungsübersichten	gering	2	2	4
PP08	Visuelle Darstellung des Projektstatus mittels grafischer Benutzeroberfläche	hoch	5	3	15
PP09	Archivierung	gering	1	2	2
PP10	Resultat: Automatische Verarbeitung auf einer kontinuierlich aktuellen Datengrundlage	mittel	3,65		

Die vorbereitenden Maßnahmen im Controlling-Prozess für die modellbasierte Angebotskalkulation wird mit einem niedrigen Automatisierungsgrad bewertet, da die Anbindung der einzelnen Dokumente oder Modelle überwiegend manuell durchgeführt werden muss. Zu bemerken ist jedoch, dass die Anbindung einzig am Anfang des Projektes manuell zu erfolgen hat. Nach Änderungen oder Erweiterungen werden diese Schritte automatisiert durchlaufen.

Die Aktualisierung des Digitalen Schattens auf Basis geänderter Planungsstände erreicht einen mittleren Automatisierungsgrad. Auch in diesem Ablauf muss anfangs eine Zuweisung unterschiedlicher Informationen erfolgen. Allerdings wird dieser Aufwand durch einen funktionierenden unternehmensinternen Standard vereinfacht und der Umfang wird folglich reduziert.

Der Vergleich unterschiedlicher Modellstände erreicht einen hohen Automatisierungsgrad. Dieser wird unter anderem aus demjenigen Grund verringert, da der Prozess teils manuell gestartet und von einer Person bewertet werden muss.

Die modellbasierte Absteckung und Erfassung erreichen einen mittleren Automatisierungsgrad, da einige Vorarbeiten sowie die eigentliche Absteckung auf der Baustelle per se manuell durchzuführen sind. Die Anbindung an die Modelldaten verläuft systematisch automatisiert und infolgedessen aufwandsreduziert bezogen auf eine manuelle Übertragung.

Der baustellenbezogene Prozess zur Erfassung des Leistungsstandes erreicht ebenfalls einen mittleren Automatisierungsgrad. Ebenfalls an dieser Stelle sind wesentliche Abläufe manuell durchzuführen. Dies beinhaltet unter anderem die Bedienung des Gerätes.

Der resultierende Abgleich der Monitoringdaten mit dem Planmodell erreicht einen hohen Automatisierungsgrad. Gemindert wird dieser durch die Klassifizierung und Bewertung der Abweichungen als Resultate der Modellanalyse, die zu einzelnen Teilen manuell durchgeführt werden muss. Zu bemerken ist jedoch die zeitliche Ersparnis, die durch die Verkettung innerhalb dieser Arbeitsabläufe ermöglicht wird. Nach Aussagen von Kollegen des Verfassers dieser Arbeit wird der zeitliche Aufwand für die Dokumentation und Beweisführung des Projektes gegenüber dem Bauherrn deutlich reduziert und vereinfacht. Ein zeitlicher Aspekt ist in dieser Aussage jedoch nicht beinhaltet.

Die Einbindung von Leistungs- und Rechnungsübersichten erreicht einen geringen Automatisierungsgrad. Dies basiert unter anderem auf der fehlenden Kompatibilität der verwendeten Software und der diesbezüglich eingesetzten Arbeitsabläufe. Bezogen auf die Informationen aus der Arbeitskalkulation erfolgt keine zeitnahe Aktualisierung der Informationen. Grund dafür ist unter anderem der Prozess der Leistungsmeldung bzw. der jeweiligen Abrechnung. Diese werden in der Fallstudie konventionell und in größeren Abrechnungszeiträumen durchgeführt. Eine quasikontinuierliche Dispositionssteuerung wird infolgedessen nicht erreicht.

Die visuelle Aufbereitung der Daten aus dem Projektgeschehen erreicht einen hohen Automatisierungsgrad. Die Aktualität der Daten in den jeweiligen grafischen Benutzungsoberflächen der einzelnen Projekte ist dabei stets gegeben. Durch die automatisierte Einbindung des Lieferungszeitpunktes resp. des Fertigstellungsgrades inkl. der geometrischen Abweichungen und des zugehörigen Status resultiert eine Bauwerksübersicht in Quasi-Echtzeit. Diese Dauer der jeweiligen Zeitabstände, welche die diskreten Abstände eindeutig definiert, hängt ausschließlich von den auf der Baustelle durchgeführten Erfassungen ab. Im Falle der Lieferdaten erfolgt somit eine Echtzeiterfassung.

Die Archivierung erreicht einen geringen Automatisierungsgrad. Dies wird durch die manuelle Zuweisung der Dokumente begründet, die innerhalb des Digitalen Schattens erfolgen muss. Obwohl die Übertragung des DS in den Speicherort des Archivs automatisiert erfolgt, wird dies nicht maßgeblich in die Bewertung einbezogen, da der bloße Übertragungsprozess für diese Untersuchung nach Ansicht des Verfassers nicht maßgebend ist.

Für eine abschließende Bewertung anhand des Automatisierungsgrades wird eine Gewichtung durchgeführt. Das Ergebnis gilt als Prüfprozess 10. Dabei erhalten diejenigen Prozesse eine höhere Gewichtung, die häufiger in der empirischen Untersuchung in Kapitel 2.3 genannt oder dort als entsprechend wichtig betitelt wurden.

Resultierend wird ein Automatisierungsgrad mittleren Ausmaßes mit einer Gesamtpunktzahl von 3,65 festgestellt. Dieser liegt nach der Definition des Punktesystems im unteren Bereich des mittleren Automatisierungsgrades. Es lässt sich feststellen, dass der in der empirischen Untersuchung identifizierte hohe Bedarf an Automatisierung in der Generierung resp. der Weiterleitung von Informationen innerhalb der Bauprojektorganisation zu einem gewissen Anteil gedeckt werden kann. Die Untersuchung hat eine Beschleunigung der Prozessgeschwindigkeit durch die Verknüpfung einzelner bisher manuell durchgeführter Prozesse durch neu generierte automatisierte Prozesse sowie durch die Anbindung von Schnittstellen ergeben. Die Steigerung des Automatisierungsgrades durch die eingeführten Prozesse und deren inbegriffeneren Schnittstellen kann erreicht werden. Viele der Prozesse sind zwar manuell zu starten, da eine sehr heterogene Soft- und Hardwarelandschaft vorliegt und eine Verbindung teils selbstständig hergestellt werden muss, der Ablauf erfolgt hingegen automatisiert. Ferner konnte eine teilautomatisierte Etablierung der Projektumgebung auf einer cloud-plattformartigen Soft- und Hardwareumgebung bei Projektstart etabliert werden. Dies führt zusätzlich zu einer Reduzierung der Dauer der Informationsaufbereitung und -übertragung, was wiederum in einer Verringerung der Latenz der Entscheidungsfindung sowie der Steigerung der Aktualität der zugehörigen Informationen resultiert. Zu beachten ist diesbezüglich die Art der Entscheidungsebenen, die verwendet werden können.

Eine der übergreifenden Problemstellungen, die sich in der empirischen Untersuchung herausgestellt haben, war die niedrige Konsistenz der Daten, die größtenteils manuell durch Personal in die EDV-Systeme eingegeben werden. Durch die automatisierte Erfassung und teilautomatisierte Interpretation der Daten des Leistungsstandes auf der Baustelle konnte diesbezüglich jedoch eine hohe Konsistenz der zugehörigen Informationen festgestellt werden. Diese führte ebenso zu dem Resultat, dass unter anderem eine automatisierte Erfassung von Daten die Bereitstellungszeit von notwendigen Informationen für Steuerungs- oder Entscheidungsprozesse verkürzen kann. Für menschenbezogene Entscheidungsebenen wird eine zentrale Stelle etabliert, an der die für die Entscheidungsfindung notwendigen Informationen zusammenfließen. Dies ist eine zentrale Datenhaltung als Single Source of Information, in der eine visuelle Darstellung des Leistungsstandes in Echtzeit mittels visueller Benutzungsoberfläche für eine Entscheidungsgrundlage etabliert ist.

7. Resümee

In einer abschließenden Zusammenfassung werden die wesentlichen Ergebnisse der Arbeit im Hinblick auf die wissenschaftlich fundierte Entwicklung einer Regelungsmöglichkeit zur Beschleunigung der durch den Menschen vorgegebenen Prozessgeschwindigkeit in Bauprojekten ergebnisorientiert zusammengetragen und vor dem Hintergrund der Zielstellung bewertet. Die zu Beginn der Arbeit formulierten Forschungsfragen werden aufgegriffen und resümierend beantwortet. Anknüpfend wird innerhalb eines Fazits der wissenschaftliche Mehrwert der Forschungsarbeit für die Baubetriebswissenschaft reflektiert.

Das Kapitel schließt mit einem Ausblick über zukünftigen Forschungsbedarf und eine Einordnung der Ergebnisse in die aktuelle Baupraxis.

7.1. Zusammenfassung und Fazit

Die Automatisierung von Prozessen innerhalb von Bauprojekten weist ein hohes Potenzial an Verbesserungsmöglichkeiten auf. Von substanzieller Bedeutung in diesem Kontext ist eine Steigerung resp. die Einhaltung einer hohen Effizienz in den Prozessen der Planung und Ausführung. Da viele der bis dato verwendeten Bauverfahren bereits einen hohen Digitalisierungsgrad und folglich einen hohen Automatisierungsgrad aufweisen, gestaltet sich die Frage, an welcher Stelle eine Änderung notwendig ist, um die geringe Effizienz, die aktuell in einigen Bereichen der Bauindustrie herrscht, zu steigern.

In den empirischen Untersuchungen, die der vorliegenden Arbeit zugrunde liegen, stellt sich der Bedarf nach einer Automatisierung der von Menschen durchgeführten Prozesse innerhalb von Bauprojekten heraus. Das Bauprojekt-Controlling bietet diesbezüglich mit seinen bis dato häufig manuell durchgeführten Prozessen der Erfassung, Verwendung und Interpretation von Daten ein hohes Potenzial zur Steigerung dieser Effizienz. Aus diesem Grund bestand das zentrale Ziel der vorliegenden Dissertation darin, eine Regelungsmöglichkeit innerhalb des Bauprojekt-Controllings zu entwickeln, die zu einer Beschleunigung der durch den Menschen vorgegebenen Prozessgeschwindigkeit innerhalb von Bauprojekten führt. Diesbezüglich wurde folgendermaßen vorgegangen.

Innerhalb der Einleitung in **Kapitel 1** wurde zunächst die Problemstellung skizziert. Trotz der fortschreitenden Digitalisierung und der digitalen Transformation aller Industriezweige, stagniert die Produktivität als Indikator für Effizienz im Bauwesen auf einem niedrigen Niveau. Dies ist in der aktuellen Zeit, in der in anderen Wirtschaftszweigen teils disruptiv technologischer Fortschritt erzielt wird, nur bedingt verständlich. So entstehen in diesen Zweigen gänzlich neue Organisationsformen durch umfangreiche informationstechnische Vernetzungen. Folglich lässt sich im Allgemeinen ein hohes Potenzial für eine Produktivitätssteigerungen vermuten. Im Baugewerbe setzt dies jedoch nicht ein.

Ein nicht unerheblicher Teil aktueller Bauverfahren wird trotz fortgeschrittener Mechanisierung bis dato mit einem hohen personellen Aufwand durch manuelle Tätigkeiten bestimmt. Infolgedessen gibt letztendlich der Mensch die Geschwindigkeiten der Prozesse vor und bildet als primär ausführende Kraft das zentrale Bindeglied in der sozio-ökonomisch-technischen Struktur des Bauwesens. Er bildet neben den technischen Faktoren den zentralen Aspekt von Verbesserungsbestrebungen. Ohne seine konzeptionellen Fähigkeiten würden viele Entwicklungen hinter ihren Möglichkeiten bleiben. Betrachtet man folglich die Vorgabe der Prozessgeschwindigkeit innerhalb der Bauprozesse durch den Menschen und deren stufenweise Entwicklung gemäß der evolutionären Innovation, so stellt die Geschwindigkeit bei der Erfassung, Bereitstellung und Interpretation von Informationen eine zentrale Größe dar. Schreitet die Entwicklung von technischen Systemen weiterhin in einer hohen Geschwindigkeit voran und bleibt hingegen die Prozessgeschwindigkeit durch den Menschen auf einem konstanten Level, so kann folglich keine Steigerung der Produktleistung resp. der Produktivität im Sinne einer iterativen oder evolutionären Innovation erfolgen. Für eine umfangreiche Vernetzung gilt eine möglichst automatisierte Transformation des Bauwerks aus der Planung in das finale Produkt als Grundvoraussetzung.

Der Darlegung der Problemstellung in Kapitel 1 folgte die Zielsetzung der Arbeit, die dem Untersuchungsgegenstand den Rahmen gab. Daran anschließend erfolgte die Einordnung der Forschungsmethodik und eine Eingrenzung des Forschungsumfangs inklusive getroffener Annahmen.

In **Kapitel 2** wurde der Forschungsbezugsrahmen gebildet und es wurden die terminologischen Grundlagen erläutert. Um den Forschungsbezugsrahmen festzulegen, wurde der ersten Forschungsfrage nachgegangen, welche Problemstellungen aktuell in der Projektbearbeitung vor dem Hintergrund der digitalen Transformation in Praxis und Theorie bestünden. Diesbezüglich wurden zwei empirische Untersuchungen durchgeführt. Als Resultat galt ein hoher Bedarf an Automatisierung in der Generierung resp. Weiterleitung von Informationen innerhalb der Bauprojektorganisation. Grund dafür ist ein bis dato hoher bürokratischer Aufwand bei der Projektbearbeitung und somit ein hoher manueller Aufwand für Arbeit, die nicht das Kerngeschäft der Projektbeteiligten bildet. Dieser Aufwand besteht zu großen Teilen in der manuellen Eingabe, Pflege und Verarbeitung von Daten und führt zu einem hohen Aufwand für nicht wertschöpfende Tätigkeiten. Eine Begleiterscheinung ist die niedrige Konsistenz der manuell eingegebenen Daten. Der Mensch ist folglich bei der Dateneingabe und -verarbeitung eine bedeutende Fehlerquelle. Neben diesen Problemstellungen wurde ebenso ein häufig zeitverzögerter Steuerungsprozess als Problemstellung aufgeführt. Dies basiert wiederum auf meist manuell durchgeführten Prozessen und resultiert in ebenfalls zeitverzögerten Entscheidungsprozessen.

Im Zuge der Untersuchung des Forschungsrahmens konnte der Prozess des Controllings, spezifischer des Bauprojekt-Controllings als zentraler zu betrachtender Bereich innerhalb des Projektablaufes identifiziert werden. Dieser wurde in **Kapitel 3** als Kernthematik der vorliegenden Arbeit und folglich als Grundlagenteil beschrieben. Zunächst wurde die Herleitung des Themenkomplexes des Controllings dargestellt und auf die Systematik der Kybernetik zurückgeführt. Dem liegt die Notwendigkeit zugrunde, gegenüber Einwirkungen aus der Umgebung beständig zu sein. Um darauf reagieren zu können, sind die grundsätzlichen Abläufe innerhalb der Prozesse zu steuern resp. zu regeln, sofern das System einen entsprechenden Aufbau aufweist. Daraus wurden die zentralen Begriffe der Steuerkette, des Steuerkreises und des Regelkreises abgeleitet, die innerhalb des Bauwesens durch eine Mehrebenensteuerung adaptiert werden. Diese bildet den Rahmen, in den das Bauprojekt-Controlling innerhalb eines Projektes eingebettet ist. Spezifischer wurde dies anhand der Steuerungseinrichtungen Durchführungs- und Dispositionssteuerung vor, während und nach der Bauausführung betrachtet. Es wurde konstatiert, dass durch eine Erhöhung der Prozessgeschwindigkeit dieser beiden Steuerungseinrichtungen auftretende Störgrößen innerhalb der Bauausführung quasi-kontinuierlich erfasst und zeitnah verarbeitet werden können. Infolgedessen werden wiederum zeitnahe Prognosen mit Entscheidungsvorlagen ermöglicht, welche dem Bauprojektmanagement in der Durchführungssteuerung helfen, zeitnah einzugreifen und frühestmöglich Gegenmaßnahmen einzuleiten.

Unter Beachtung der Erkenntnisse aus den empirischen Untersuchungen wurde in **Kapitel 4** der technische und sozio-technische Bezugsrahmen der Arbeit unter Zuhilfenahme der Thematik des systemischen und kybernetischen Denkens in zirkulärer Darstellung vor dem Hintergrund der Industrie 4.0 erläutert. Dies entsprach zum Zeitraum der Arbeit dem aktuellen Stand der

Forschung. Folglich wurde zunächst der Bereich Industrie 4.0, spezifischer das *Bauen 4.0* als das zugehörige Äquivalent innerhalb des Bauwesens betrachtet. Grundlage dafür ist die Verwendung der Methode BIM, mit deren Hilfe eine Steigerung der Individualität in Richtung der Wünsche der Kundschaft, die Erreichung einer neuen Stufe an Organisation und Steuerung innerhalb der Bauprozesse sowie die Betrachtung des gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks erreicht werden kann. Im Allgemeinen hat sich ein neues Wertschöpfungspotenzial durch innovative Produkte, neue Dienstleistungen und Geschäftsmodelle sowie effizientere betriebliche Prozesse abgebildet. Als Grundlage ließen sich unterschiedliche technologische sowie sozio-technische Kriterien erfassen. Dazu gehörte unter anderem eine Kombination aus physischer mit digitaler Infrastruktur. Auf diese Weise lässt sich eine wertschöpfende Verwendung aller Daten aus dem Produktlebenszyklus durch Cyber-Physische Systeme gewährleisten. Ferner gilt die Kombination aus physischen Systemen als messende und handelnde sowie Menschen als gestaltende und entscheidende Instanz als sinnvolle Grundlage einer verbesserten Zusammenarbeit. Die Analytik bzw. Datenanalyseverfahren im Bereich der digitalen Infrastruktur sind in diesem Zusammenhang von ausgesprochen hoher Bedeutung, da die Daten in der richtigen Form und zur richtigen Zeit von einem zu einem anderen System übertragen werden müssen. Auf einer solchen Basis wird eine konsistente Datenumgebung für eine automatisierte Überwachung des Baufortschritts generiert, auf welcher Reaktionen in Echtzeit ermöglicht werden können. Dadurch besteht die Möglichkeit der Reduzierung von Problemen, die bei der Validierung, bei der Interpretation und bei der effektiven Verarbeitung von erfassten Daten auftreten könnten.

In **Kapitel 5** wurden die in der Theorie dargestellten Prozesse, Methoden und Verfahren auf eine praktische Ebene projiziert. Diesbezüglich erfolgte eine Ausrichtung der zugehörigen Methodik und eine Einbindung der zugehörigen Bausteine der Industrie 4.0 in den Kontext des Bauwesens. Dabei spielte die Datendurchgängigkeit als Kernaspekt der Industrie 4.0 eine übergeordnete Rolle. Es wurde konstatiert, dass jegliche Kommunikation über vernetzte resp. verteilte Systeme erfolgt. Anschließend erfolgte die der Arbeit zugrunde liegende Definition der Methode Digital Twin Construction (DTC)³⁵² sowie des Paradigmas Digitale Abbilder. Diese Methode ist eine datenzentrierte Systematik für das Management von Projekten im Bauwesen innerhalb eines geschlossenen Datensystems. Sie wurde als eine Evolution der Methode BIM entwickelt, sodass BIM-Modelle weiterhin als Teil der Methode DTC erhalten bleiben können. Innerhalb des Paradigmas wurden drei Arten von Modellen definiert: das Digitale Modell, der Digitale Schatten und der Digitale Zwilling. In diesen Fällen besteht jede Art der Modelle aus einem virtuellen und einem physischen Teil. Der virtuelle Teil wird als eine Summe von Daten und als ein hinreichend genaues virtuelles Abbild des physischen Teils gebildet. Zwischen den jeweiligen Teilen der drei Arten der Modelle bestehen Verbindungen in unterschiedlichen Ausprägungen. Definiert sind die manuelle und die automatische Übertragungsart. Entlang dieser Verbindungen werden temporäre Daten übertragen, die den Zustand des jeweiligen Teils des Bauwerks vorgeben resp. manipulieren. Auf diese Weise bilden die Ergebnisse der Simulationen aus dem virtuellen Teil des Bauwerks die Grundlage für die Steuerung des physischen Teils.

³⁵² Diese Methode basiert auf Sacks, et al. 2020a und wurde um einzelne Aspekte erweitert

Ferner bilden die Daten aus der Erfassung des physischen Teils des Bauwerks die Grundlage für die Datenänderung im virtuellen Teil, die sog. Datenaggregation. Alles verläuft in einer zyklischen Form auf Basis einer zentralen Datenhaltung innerhalb von Cloud-Systemen.

Im Anschluss wurde die Einführung der Methode der Digital Twin Construction in einem Unternehmen beschrieben. Es wurde ein dreistufiges Vorgehen konzipiert, das sich mit unterschiedlichen Arten Digitaler Abbilder und infolgedessen ebenso mit unterschiedlichen Stufen der Datenintegration auseinandersetzt. Die unterschiedlichen Stufen der Datenintegration beinhalten verschiedene Ausprägungen sowohl an Semantik als auch an Rahmenbedingungen für eine zugehörige IT-Infrastruktur. Es konnte erfolgreich eine Systematik inklusive einer Struktur der Datenhaltung etabliert werden, bei der die Digitalen Abbilder so aufbereitet sind, dass sie für jeden möglichen Anwendungsfall in der Umsetzung entsprechend erweitert werden können. Schlussfolgernd konnte festgestellt werden, dass ebenso BIM-Modelle als Digitales Modell, Digitaler Schatten oder Digitaler Zwilling eingesetzt resp. weitergeführt werden können, sofern sie anfangs entsprechend etabliert wurden. Als Voraussetzung für eine hinreichende Ausschöpfung des Potenzials wurde die Etablierung einer Digital-Twin-Construction-Plattform vorgeschlagen und beschrieben.

Im Anschluss erfolgte die Erläuterung der Anwendung der Digital Twin Construction auf das Bauprojekt-Controlling. Dabei wurde dediziert auf die Prozessschritte innerhalb des Bauprojekt-Controllings vor, während und nach der Bauausführung sowie eine aus der Methode DTC resultierende Änderung innerhalb der Prozessgeschwindigkeit eingegangen. Es wurde gezeigt, dass die zügige Verfügbarkeit der Informationen auf Basis Digitaler Abbilder auf einer zentralen Plattform diese Zugriffs- und somit ebenfalls die Such- resp. Wartedauer des Personals reduzieren kann. Ferner ermöglicht eine solche kontextabhängige, zentrale Speicherung der Informationen eine kontinuierliche und zeitnahe Datenverwertung, woraus eine zeitnahe Bewertung von Störfällen und ebenso zeitnahe Bewertung von Chancen und Möglichkeiten innerhalb des Bauprojekt-Controllings resultieren kann. Durch die Verringerung der jeweiligen Latenzen in der Datenverarbeitung gilt als überbleibende und folglich ausschlaggebende Latenz diejenige, die das entsprechende Fachpersonal für das Treffen der jeweiligen Entscheidung benötigt.

Bei der Anwendung der DTC auf das Bauprojekt-Controlling konnte eine neue Systematik von Steuerung und Regelung entwickelt werden. So war es möglich, durch die Reduzierung der vorab beschriebenen Latenzen innerhalb einzelner Controllingmechanismen Steuer- sowie Regelkreise zu erreichen. Ausschlaggeben dafür sind die Durchführungs- sowie die Dispositionssteuerung als Steuerungseinrichtungen. Dabei lassen sich mit automatisierten Bauwerksmonitoring-Mechanismen entsprechend der Zunahme der Prozessgeschwindigkeit geringe Durchlaufzeiten eines Zykluses der Durchführungssteuerung erreichen. Die Dispositionssteuerung ermöglichte entgegen der Durchführungssteuerung keine geringe Durchlaufzeit eines ihrer Zyklen. Die dort verwendeten Daten könnten zwar zeitnah und automatisiert in die Arbeitskalkulation übertragen werden. Der Turnus wäre jedoch ungleich weiter gefasst, da in dieser Steuerungseinrichtung grundlegend Eingriffe in das Element der Planung erfolgen und diese vor dem Hintergrund der Betrachtung der Auswirkungen auf das Projektende getätigt werden müssen.

Der in der Theorie entwickelte Regelkreis basiert auf den Forschungsfragen, die sich wiederum gemäß den empirischen Untersuchungen und dem aktuellen Stand der Forschung ergeben haben. Folglich wurde in **Kapitel 6** der Regelkreis validiert und reliabilität. In dieser Umsetzung in der Baupraxis wurde zu anfangs eine Auswahl an Prozessen aus der Sphäre eines Bauprojektes aus Sicht eines Bauunternehmens aufgegriffen, die eindeutig zu Resultaten aus den in der Empirie herausgearbeiteten Defiziten zugewiesen werden konnten. Aus diesen ausgewählten Defiziten und den zugehörigen Prozessen eines Bauprojektes wurden eine theoretisch ideale Umsetzung mit einer praktisch umsetzbaren Abgrenzung abgeleitet. Anschließend wurden Prüfziele beschrieben, nach denen die Güteprüfung des durchgeführten Realisierbarkeitstest erfolgen konnte. Dem folgte die Einordnung der betrachteten Systeme in die Funktionsstufen mit einer definitorischen Festlegung der durchführbaren Prozesse vor dem Hintergrund der Modelle in unterschiedlichen Definitionsstufen der Digitalen Abbilder. Durch die entwickelten Prozesse und Schnittstellen innerhalb der im Realisierbarkeitstest verwendeten virtuellen Umgebung konnte erstmals ein Digitaler Schatten nach Funktionsstufe 2 der Digital Twin Construction etabliert und verwendet werden. Die Bewertung des Realisierbarkeitstests brachte folgende Ergebnisse:

Es wurden große Fortschritte in Richtung der Approximation einer ganzheitlichen virtuellen Abbildung des komplexen sozio-ökonomischen-technischen Systems *Bauen* erzielt, was bis dato lediglich in Teilaspekten softwaretechnisch abgebildet werden konnte. Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit, eine Regelungsmöglichkeit zu entwickeln, die zu einer Beschleunigung der durch den Menschen vorgegebenen Prozessgeschwindigkeit innerhalb von Bauprojekten führen sollte, wurde erreicht. Diese Beschleunigung wurde durch die Verknüpfung einzelner bisher manuell durchgeführter Prozesse durch neu generierte, automatisierte Prozesse sowie der Anbindung resp. der Erweiterung von Schnittstellen sowohl in Bauverfahren als auch in Software ermöglicht. Es konnte eine teilautomatisierte Etablierung der Projektumgebung auf einer cloud-plattformartigen Soft- und Hardwareumgebung beim Projektstart etabliert werden. Auf dieser Plattform wird eine automatisierte Aktualisierung der Modellinformationen mit den jeweils aktuellen Informationen aus der Planung, der Arbeitsvorbereitung sowie der Bauausführung inkl. einer automatisierten Generierung von Berichten über die Unterschiede in den Projektständen ermöglicht. Diese Berichtsdokumente resp. die zugehörigen Modelle werden wiederum automatisiert an die Planung, die Arbeitsvorbereitung sowie die Projektleitung im Projektgeschäft übermittelt. Der zugehörige Informationsverlust bei der Übertragung fällt gering aus. In der Übertragung der Informationen auf die Baustelle treten noch vereinzelt Problemstellung aufgrund der fehlenden Cyber-Physischen Systeme in der Bauausführung auf. Diese Probleme werden in Zukunft aufgrund des verbreiteten Einsatzes von CPS vernachlässigbar. Unabhängig dieser Problemstellungen konnte ein automatisierter Abgleich des Projekt-Leistungsstands mit den Plan-Informationen auf der Baustelle erreicht werden, woraus wiederum bei Abweichungen oder Fertigstellung automatisiert Berichte sowie aktuelle Modellstände generiert wurden.

Als eine der übergreifenden Problemstellungen konnte in den empirischen Untersuchung die niedrige Konsistenz der Daten identifiziert werden, die größtenteils manuell durch Personal in

die EDV-Systeme eingegeben werden. Durch die automatisierte Erfassung und teilautomatisierte Interpretation der Daten des Leistungsstandes auf der Baustelle kann eine hohe Konsistenz der zugehörigen Informationen festgestellt werden.

Eine Zielstellung der Arbeit war die Frage nach der Steigerung des Automatisierungsgrades bei einer quasi-kontinuierlichen und selbstregulierenden Datenaktualisierung eines Steuerungsprozesses mit bis dato auf dem Markt verfügbaren und somit praxisnahen Mitteln. Dort geht die Problematik mit einher, dass Ergebnisse oder Maßnahmen aus Steuerungsgesprächen weder zeitnah noch effizient eingeleitet oder in der Bauausführung umgesetzt werden, da nicht zu jeder Zeit die notwendigen Informationen aufbereitet zur Verfügung stehen. Für diese Frage wurde ein positives Resultat erzielt. Es konnte die Steigerung des Automatisierungsgrades durch die eingeführten Prozesse und deren inbegriffene Schnittstellen erreicht werden. Viele der Prozesse waren zwar manuell zu starten, da eine sehr heterogene Soft- und Hardwarelandschaft vorlag und eine Verbindung teils selbstständig hergestellt werden musste, der Ablauf erfolgte hingegen automatisiert.

Eine solche Steigerung führte in der vorliegenden Untersuchung zusätzlich zu einer Reduzierung der Dauer der Informationsaufbereitung und -übertragung, was wiederum in einer Verringerung der Latenz der Entscheidungsfindung sowie der Steigerung der Aktualität der zugehörigen Informationen resultierte. Zu beachten ist diesbezüglich die Art derjenigen Entscheidungsebenen, die bei einem solchen Prozess verwendet werden können, denn nicht in allen Ebenen ist eine Regelung möglich. Eine solche setzt die Reduzierung oder nach Möglichkeit den Ausschluss menschlicher Interaktionen voraus.

Um die angesprochenen Problemstellungen innerhalb des Projektcontrollings zu lösen, wurde in der Untersuchung gezeigt, dass unter anderem eine automatisierte Erfassung von Daten die Bereitstellungszeit von notwendigen Informationen für Steuerungs- oder Entscheidungsprozesse verkürzt. Für menschenbezogene Entscheidungsebenen wurde eine zentrale Stelle etabliert, an der die für die Entscheidungsfindung notwendigen Informationen zusammenfließen. Dies ist eine zentrale Datenhaltung als *Single Source of Information*, in der eine visuelle Darstellung des Leistungsstandes in Echtzeit mittels visueller Benutzungsoberfläche für eine Entscheidungsgrundlage etabliert wurde.

Insgesamt leistet die vorliegende Arbeit einen wissenschaftlichen Beitrag zur Lösung der Effizienzproblematik sowie zur Steigerung der Prozessautomatisierung innerhalb des Bauprojekt-Controllings. Durch die Entwicklung zusammenhängender Prozessketten sowie deren Umsetzung innerhalb eines Realisierbarkeitstests wurde dem innerhalb der Baubetriebswissenschaften geforderten Wechselspiel zwischen Theorie und Realität Rechnung getragen. Darüber hinaus wurde die Nützlichkeit der Ergebnisse durch die Bewertung der Automatisierungsgrade vor dem Hintergrund der in den empirischen Untersuchungen herausgearbeiteten Problemstellungen des Bauprojekt-Controllings festgestellt. Folglich wird den Bau- und Projektleitenden sowie den Projektbearbeitenden die Möglichkeit der Effizienzsteigerung innerhalb ihres Berufsalltags gegeben, es wird ermöglicht ihre Arbeit zu erleichtern und die Bauwirtschaft für Arbeitnehmer wieder attraktiver zu gestalten.

7.2. Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wird behandelt, wie ausgewählte Prozesse des Bauprojekt-Controllings automatisiert werden können. Grundlage dafür bilden eine durchgehende Prozesskette innerhalb eines verwendeten Hard- und Softwaresystems sowie dessen kontinuierliche Verfügbarkeit von nahezu jedem möglichen Ort, an dem ein Bauwerk errichtet werden kann. Das betrachtete System resp. die Plattform der Digital Twin Construction bietet diesbezüglich jeder projektbeteiligten Person einen kontinuierlichen Zugriff auf die Projektinformationen. Dies entspricht dem von BERG im Jahr 1984 getätigten Postulat, in Zukunft würden zu der Geräteausrüstung jeder größeren Baustelle auch der Kleincomputer gehören. Bauleiter und Arbeitsvorbereiter würden sich ohne Mittelsleute der Hilfe der EDV bedienen und zu jeder Zeit wissen, wie es um ihre Baustelle stehe und warum sie so stünden.³⁵³

Eine solche Umsetzung wurde allerdings bis dato nur in Grundzügen erreicht. In Kapitel 4.5 wurde innerhalb der Untersuchung des aktuellen Stands der Forschung auf eben diese, bisher fehlende praktische Umsetzung der Einbindung Digitaler Abbilder in die Methode der Digital Twin Construction sowie eine bisher prototypisch umgesetzte Einbindung polysensoral erfasster Daten in Echtzeit eingegangen. Aus diesem Grund wurde in dieser Arbeit eine durchgehende Prozesskette innerhalb des Bauprojekt-Controllings betrachtet, welche jedoch auf einen im Rahmen des Forschungsvorhabens vertretbaren Umfang reduziert wurde. Als weiteres Forschungspotenzial im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtung der jeweiligen Baustelle kann folglich die Ergänzung der noch fehlenden Prozesse innerhalb der betrachteten Prozesskette des Bauprojekt-Controllings sowie das Schließen der zugehörigen Schnittstellen identifiziert werden. Dies wird in naher Zukunft vereinfacht umgesetzt werden können, da sich bereits eine Vielzahl an Forschungsvorhaben mit ausgewählten Prozessen beschäftigen. Beispielsweise kann hierzu ein Konzept herangezogen werden, innerhalb dessen Bauwerke automatisiert mittels UAV (Unmanned Aerial Vehicle) erfasst, via Photogrammetrie in eine Punktwolke prozessiert und anschließend geometrisch ausgewertet werden. Die Auswertung basiert auf Methoden der Künstlichen Intelligenz, speziell auf sog. Machine Learning-Verfahren. Dabei ist konzipiert, die Bauteile innerhalb der Punktwolke automatisiert zu erkennen und anschließend zu attribuieren. Diesbezüglich sieht das Konzept vor, jegliche Teilschritte automatisiert erfolgen zu lassen, sodass eine kurzzyklische Informationsbereitstellung erreicht wird. Eine praktische Umsetzung erfolgt in dem entsprechenden Beitrag allerdings nur begrenzt.³⁵⁴

Eine weitere Untersuchung ist die Generierung von Aufwandswerten aus historischen Informationen sowie Umgebungsinformationen nach STÖCKL & HOFSTADLER. Informationen werden gesammelt und mittels einer Methode der Künstlichen Intelligenz verarbeitet.³⁵⁵ Bezogen auf Prozesse des Bauprojekt-Controllings können daraus neuronale Netze für Prognostizierungen

³⁵³ Vgl. Berg 1984, S. 49.

³⁵⁴ Vgl. Glock; Kaufmann & Tschickardt 2021.

³⁵⁵ Vgl. Stöckl & Hofstadler 2021, S. 147.

verwendet werden, da sie sich für diesen Anwendungsfall sehr gut eignen. Das Wissen aus vergangenen Projekten kann infolgedessen zielsicher gespeichert werden und ist folglich für zukünftige Bauvorhaben abrufbar.

Weiteres Forschungspotenzial im Sinne der gezeigten Fallstudie stellt das Schließen der Latenzen der Informationsverarbeitung dar, sodass eine Echtzeitfähigkeit des Systems hergestellt werden kann. In der vorliegenden Arbeit konnte lediglich eine Reduzierung der genannten Latenzen erreicht werden. So könnte als Beispiel die Erfassung der Lieferanten resp. Lieferscheine bei der Anlieferung während der Bauausführung sowie eine beschleunigte Abrechnung innerhalb des Kosten-Soll-Ist-Vergleich betrachtet werden.

Im Allgemeinen besteht eine hohe Dynamik in der Weiterentwicklung von Technologien wie Cyber-Physischen Systemen, bei Analyseverfahren im Zuge der Data Analytics sowie im Allgemeinen bei Prozessen des Projekt-Controllings. Vor allem in den angesprochenen Analyseverfahren wird zukünftig und längerfristig ein erheblicher Forschungsbedarf bestehen. Innerhalb dieser Verfahren erfolgt ein „kognitives Outsourcing“³⁵⁶, indem maschinelle Verfahren bestimmte, von Menschen betrachtete Problemstellungen verarbeiten und Resultate im Hinblick auf eine wiederum vom Menschen formulierte Fragestellung präsentieren. Dieses *Augmented Intelligence* kann eine Unterstützung der Arbeit des Menschen darstellen, sofern die nutzende Person in der Lage ist, das von der KI bereitgestellte Resultat zu bewerten und auf dessen Basis eine adäquate Entscheidung zu treffen. Das zugehörige Verfahren des „human in the loop“³⁵⁷ zielt darauf ab, durch Analyseverfahren Entscheidungsvorlagen vor dem Hintergrund einer spezifischen Fragestellung zu erarbeiten. Die abschließende Entscheidung ist jedoch zwingend durch Menschen zu treffen. Auf diese Weise können unter anderem wirtschaftliche sowie ethische Rahmenbedingungen beachtet und eine Verantwortungsübernahme sichergestellt werden.

Die vorab genannten offenen Forschungspotenziale zielen in letzter Konsequenz auf die ganzheitliche Generierung und Verwendung eines Digitalen Zwillings ab. Diese finale Form eines Digitalen Abbildes erfordert eine umfangreiche Untersuchung einer Vielzahl offener Fragestellungen bei einer gleichzeitigen Bündelung und Einbindung der jeweiligen Ergebnisse. Alle eingebrachten Informationen, Prozesse, Verfahren, etc. sind stets vor der Einbindung auf Sorgfalt bei der jeweiligen Entwicklung zu prüfen, da möglicherweise diejenigen Variablen, die in einer algorithmischen Berechnung einbezogen wurden, nicht denjenigen entsprechen, die bei einer menschlichen Überlegung Beachtung gefunden haben.

Das durch diese Arbeit aufgezeigte hohe Potenzial an Verbesserungsmöglichkeiten, welches die digitale Transformation bereithält, kann die Grundlage für bisher unbekannte Methoden, Verfahren oder gar Geschäftsmodelle innerhalb des Bauwesens sein und dieses als einen der wichtigsten Industriezweige nachhaltig verändern. Dazu sollten sich diejenigen Personen, die in diesem Bereich arbeiten, die wichtigsten Eigenschaften weiterhin erhalten: Forschergeist, Neugier und Agilität.

³⁵⁶ Nielsen 2016.

³⁵⁷ Kirste 2019, S. 61.

Literaturverzeichnis

- Anschütz, Herbert (1974):** *Kybernetik: Kurz und bündig ; Kybernetik-Skelett*, 3. Aufl., Würzburg: Vogel.
- Avsar, et al. (2008):** *Modeling of the temple of Apollo Smintheus using photogrammetry and virtual reality*, in The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII, The International Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), ed. B5. Beijing, 357–60.
- Bark, Lennart (Verfasser); Kosel, Christopher (Betreuer) (2021):** *Eine Analyse des aktuellen Stands der Implementierung der Methode BIM im Tief- und Ingenieurbau*. Bachelorthesis, Darmstadt, Technische Universität Darmstadt.
- Becker & Kahn (2005):** *Der Prozess im Fokus*, in Prozessmanagement, Jörg Becker, Martin Kugeler, Michael Rosemann, ed. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 3–16.
- Berg, Gerhard (1984):** *REFA in der Baupraxis*, Frankfurt/Main: ZTV-Verl.
- Bergmann, Matthias (2010):** *Ergonomiegestützte Multiagentensimulation von Montageprozessen im Baubetrieb*. Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2010, Darmstadt: Inst. für Baubetrieb.
- Berner, Fritz; Kochendörfer, Bernd & Schach, Rainer (2020):** *Grundlagen der Baubetriebslehre 1*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Berns, Karsten; Wolf, Patrick & Decker, Peter (Februar 2019):** *High Quality Road Construction using 5G-AMMCOA: Autonomous Mobile Machine Communication for Off-Road Applications*. White Paper, Kaiserslautern, Technische Universität Kaiserslautern, 09.06.2022.
- Binder, Florian (2014):** *Ereignisbasierte Steuerung bauleistungsprozesse mit Echtzeit-Ortungssystemen*. Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2014, Darmstadt: Inst. für Baubetrieb.
- Bitkom (2014):** *Industrie 4.0: Volkswirtschaftliches Potenzial für Deutschland*, Berlin.
- Bitkom (2017):** *Künstliche Intelligenz: Wirtschaftliche Bedeutung, gesellschaftliche Herausforderungen, menschliche Verantwortung*.
- Bodendorf, Freimut (2006):** *Daten- und Wissensmanagement*, 2. Aufl., Berlin, Heidelberg, New York: Springer.

- Boje, Calin; Guerriero, Annie; Kubicki, Sylvain & Rezgui, Yacine (2020):** *Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research*, *Automation in Construction*, 114, 1–16.
- Borrmann, et al. (2019):** *Steckbriefe der wichtigsten BIM-Anwendungsfälle: Handreichungen und Leitfäden – Teil 6*, 24.09.2021, online verfügbar unter https://bim4infra.de/wp-content/uploads/2019/07/BIM4INFRA2020_AP4_Teil6.pdf.
- buildingSMART Deutschland e. V.:** *Die BIM Methode*, 07.06.2022, online verfügbar unter [https://www.buildingsmart.de/bim-knowhow/bim-methode#:~:text=BIM%20\(Building%20Information%20Modeling\)%2C,sind%20klar%20definierte%20Konventionen%20erforderlich](https://www.buildingsmart.de/bim-knowhow/bim-methode#:~:text=BIM%20(Building%20Information%20Modeling)%2C,sind%20klar%20definierte%20Konventionen%20erforderlich).
- Carter, Shan & Nielsen, Michael (2017):** *Using Artificial Intelligence to Augment Human Intelligence*, *Distill*, 2 (12).
- Deutsches Institut für Normung:** *Qualitätsmanagementsysteme: Grundlagen und Begriffe*.
- 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*.
- DIN IEC 60050-351 (2014):** *Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch – Teil 351: Leitetchnik*, DIN Deutsches Institut für Normung e. V.
- Engels, Gregor (2020):** *Der digitale Fußabdruck, Schatten oder Zwilling von Maschinen und Menschen*, Gruppe. Interaktion. Organisation. Zeitschrift für Angewandte Organisationspsychologie (GIO), 51 (3), 363–70.
- Finzel (2020):** *Megatrend Automatisierung: Wie Erdbewegungsmaschinen Schritt für Schritt autonomer werden*, 16.05.2022, online verfügbar unter <https://www.zepelin.com/de-de/cat/presse/megatrend-automatisierung/>.
- Fleischmann, Albert; Oppl, Stefan; Schmidt, Werner & Stary, Christian (2018):** *Ganzheitliche Digitalisierung von Prozessen*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Frank, Thorsten (2016):** *Inustrie 4.0 - Ein pragmatischer Ansatz zur Einordnung*, Baden-Baden.
- Franzetti (2019):** *Digitalisierung, digitale Transformation*, in *Essenz der Informatik*, Claudio Franzetti, ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 223–40.
- Girmscheid, Gerhard (2007):** *Forschungsmethodik in den Baubetriebswissenschaften*, 2. Aufl., Zürich: Eigenverl. des IBB an der ETH.

- Girmscheid, Gerhard (2014):** *Bauunternehmensmanagement-prozessorientiert Band 1: Strategische Managementprozesse*, 3. Aufl., Berlin: Springer Berlin.
- Girmscheid, Gerhard & Motzko, Christoph (2013):** *Kalkulation, Preisbildung und Controlling in der Bauwirtschaft: Produktionsprozessorientierte Kostenberechnung und Kostensteuerung*, 2. Aufl., Berlin: Springer Vieweg.
- Glock, Christian; Kaufmann, Fabian & Tschickardt, Thomas (2021):** *Drohnenbasierte Erfassung von as-built Modellen zur Automatisierung von Prozessen des digitalen Planens und Bauens im Brückenbau*. Beitrag, Kaiserslautern, Technische Universität Kaiserslautern.
- Gralla, Mike & Lenz, Lisa Theresa (2019):** *Digitalisierungspotenziale im Rahmen der Kostenermittlung von Bauleistungen: Digitaler Schatten – Analytik – Cyber-physische Systeme – Plattformen*, 685–98.
- Griebel, Bernhard (2000):** *Der zeitnahe Soll-ist-Vergleich aus Sicht der Baustelle*. Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2000, Berlin: Mensch & Buch-Verl.
- Hackathorn (2003):** *Minimizing Action Distance*, in *The Data Administration Newsletter*, Robert Seiner, ed. Vol. 12, 22–23.
- Heim, Marc (2002):** *Die zeitnahe Leistungsfeststellung von Baustellen - unter besonderer Berücksichtigung von Bildinformationssystemen -*, Göttingen: Cuvillier Verlag.
- Helfrich, Hede (2016):** *Wissenschaftstheorie für Betriebswirtschaftler*, Wiesbaden: Springer Gabler.
- Hofstadler (2019):** *Digitalisierte SOLL-IST-Vergleiche im Baubetrieb*, in 29. Kassel-Darmstädter Baubetriebsseminar. Schalungstechnik, Gesellschaft bR für baubetriebliche Weiterbildung - Arbeitskreis Schalung, ed.
- Hofstadler, Christian (2014):** *Produktivität im Baubetrieb*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Hofstadler, Christian & Kummer, Markus (2017):** *Chancen- und Risikomanagement in der Bauwirtschaft*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Hofstadler, Christian & Kummer, Markus (2021):** *Chances and Risks in Construction Management and Economics*, Cham: Springer International Publishing.
- Hofstadler, Christian; Motzko, Christoph (2021):** *Agile Digitalisierung im Baubetrieb*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

- IT-Service.Network:** *Cloud Act - Definition*, 03.07.2022, online verfügbar unter <https://it-service.network/it-lexikon/cloud-act#:~:text=Der%20Cloud%20Act%20erlaubt%20US,dem%20US%2Damerikanischen%20Recht%20unterliegt>.
- ITU (2012):** *Internet of Things Global Standards Initiative: New ITU standards define the internet of things and provide the blueprints for its development*, 21.02.2022, online verfügbar unter <https://www.itu.int/en/ITU-T/gsi/iot/Pages/default.aspx>.
- Jacob, Dieter; Müller, Clemens; Oehmichen, Martin (2018):** *Kalkulieren im Ingenieurbau: Strategie - Kalkulation - Controlling*, 3. Aufl., Wiesbaden: Vieweg + Teubner.
- Kaiser, Robert (2014):** *Qualitative Experteninterviews: Konzeptionelle Grundlagen und praktische Durchführung*, Wiesbaden: Springer VS.
- Kirchhof, et al. (2020):** *Model-driven digital twin construction*, in Proceedings of the 23rd ACM/IEEE International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems, Virtual Event Canada, 90–101.
- Kirste (2019):** *Augmented Intelligence – Wie Menschen mit KI zusammen arbeiten*, in Künstliche Intelligenz, Volker Wittpahl, ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 58–71.
- Klaus, Georg; Liebscher, Heinz (1979):** *Wörterbuch der Kybernetik: I. Abbildung - Multiprogramm*, Frankfurt am Main: Dietz Verlag.
- Knöchermann (2014):** *Disruptive Innovation als Erfolgsfaktor am Beispiel Amazon*, 13.05.2022, online verfügbar unter <https://www.personalradar.ch/wp-content/uploads/2015/08/Disruptive-Innovation-als-Erfolgsfaktor-am-Beispiel-von-Amazon.pdf>.
- Kornwachs, Klaus (2013):** *Technikwissenschaften: Erkennen - Gestalten - Verantworten*, Berlin: Springer Vieweg.
- Kritzinger, Werner; Karner, Matthias; Traar, Georg; Henjes, Jan & Sihn, Wilfried (2018):** *Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification*, IFAC-PapersOnLine, 51 (11), 1016–22.
- Kuntze & Mai:** *Arbeitsproduktivität - nachlassende Dynamik in Deutschland und Europa*, in WISTA – Wirtschaft und Statistik, Statistisches Bundesamt (Destatis), ed., 11–24.
- Küppers, E. W. Udo (2019):** *Eine transdisziplinäre Einführung in die Welt der Kybernetik*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Lee, Edward Ashford & Seshia, Sanjit Arunkumar (2011):** *Introduction to embedded systems: A cyber-physical systems approach*, 1. Aufl., Lulu: LeeSeshia.org.

- Lexa (2021):** *Digitale Transformation*, in Fit für die digitale Zukunft, Carsten Lexa, ed. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 11–13.
- Lunze, Jan (2020):** *Regelungstechnik 1: Systemtheoretische Grundlagen, Analyse und Entwurf einschleifiger Regelungen* das Programmsystem MATLAB, 12. Aufl., Berlin: Springer Vieweg.
- Mahami, Hadi; Nasirzadeh, Farnad; Hosseininaveh Ahmadabadian, Ali & Nahavandi, Saeid (2019):** *Automated Progress Controlling and Monitoring Using Daily Site Images and Building Information Modelling*, Buildings, 9 (3), 70.
- Mayring, Philipp (2015):** *Qualitative Inhaltsanalyse: Grundlagen und Techniken*, 12. Aufl., Weinheim, Basel: Beltz Verlag.
- Mehr, Oliver (2012):** *Polysensorale Bauprozessidentifikation durch kognitive Systeme*. Zugl. Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2012, Darmstadt: Inst. für Baubetrieb.
- Misoch, Sabina (2019):** *Qualitative Interviews*, 2. Aufl.
- Motzko, et al.:** *Eine Ontologie für die Baubetriebswissenschaft*, in Modellierung von Prozessen zur Fertigung von Unikaten, 85–90.
- Motzko, et al. (2021):** *Ausgewählte Aspekte des zeitnahen Controllings von Bauprojekten*, in Agile Digitalisierung im Baubetrieb, Christian Hofstadler, Christoph Motzko, ed. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 659–74.
- Motzko & Mehr (2016):** *Zeitnahe Leistungsfeststellung durch Sensorik und Bildverarbeitung – von einfachen bis zu komplexen Verfahren*, in Belastbare Dokumentation in der Bauausführung. Baubetriebliche, bauwirtschaftliche und rechtliche Aspekte : 14. Grazer Baubetriebs- und Bauwirtschaftssymposium, Detlef Heck, Christian Hofstadler, Markus Kummer, ed., 1. Aufl. Graz: Verlag der Technischen Universität.
- Motzko & Mehr (2018):** *Über maschinelle Auswertung von Leistungserstellungsprozessen in Bauprojekten*, in Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Andreas Kropik, Ursula Gallistel, ed. Wien: Institut für Interdisziplinäres Bauprozessmanagement, Technische Universität Wien, 397–406.
- Motzko, Christoph (2013):** *Praxis des Bauprozessmanagements: Termine, Kosten und Qualität zuverlässig steuern*, Ernst & Sohn.
- Motzko, Christoph (2022):** *Vorlesung CTM3: Kalkulation, Preisbildung und Baustellencontrolling*, Darmstadt.
- Nielsen (2016):** *Thought as a Technology*, 24.08.2022, online verfügbar unter <http://cognitivemedium.com/tat/index.html>.

- Pflug, Christoph (2008):** *Ein Bildinformationssystem zur Unterstützung der Bauprozesssteuerung*. Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2008, Darmstadt: Inst. für Baubetrieb.
- Popper, Karl R. (2010):** *Die beiden Grundprobleme der Erkenntnistheorie: Aufgrund von Manuskripten aus den Jahren 1930 - 1933*, 3. Aufl., Tübingen: Mohr Siebeck.
- Probst, Gilbert J. B. (1987):** *Selbst-Organisation: Ordnungsprozesse in sozialen Systemen aus ganzheitlicher Sicht*, Berlin, Hamburg: Parey.
- Remund & Aikat (2012):** *Drowning in Data: A Review of Information Overload within Organizations and the Viability of Strategic Communication Principles*, in *Information Overload*, Judith B. Strother, Jan M. Ulijn, Zohra Fazal, ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc, 231–50.
- Rosen, Roland; Wichert, Georg von; Lo, George & Bettenhausen, Kurt D. (2015):** *About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing*, IFAC-PapersOnLine, 48 (3), 567–72.
- Sack & Schrewe (2021):** *Digitale Transformation im Bereich Ingenieurbau: Im Spannungsfeld zwischen Tradition, Innovation und Disruption*, in *Agile Digitalisierung im Baubetrieb*, Christian Hofstadler, Christoph Motzko, ed. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 365–88.
- Sacks, Rafael; Brilakis, Ioannis; Pikas, Ergo; Xie, Haiyan Sally & Girolami, Mark (2020a):** *Construction with digital twin information systems*, *Data-Centric Engineering*, 1.
- Sacks, Rafael; Girolami, Mark & Brilakis, Ioannis (2020b):** *Building Information Modelling, Artificial Intelligence and Construction Tech*, *Developments in the Built Environment*, 4.
- Schneider, Jens & Kraus, Michael (18.09.2019):** *Digitaler Zwilling: Wenn physische und digitale Welt an der Schnittstelle von Bauingenieurwesen und Geodäsie verschmelzen*, Technische Universität Darmstadt.
- Schuh, et al. (2020):** *Industrie 4.0 Maturity Index: Die digitale Transformation von Unternehmen gestalten Update 2020*, acatech STUDIE, online verfügbar unter <https://www.acatech.de/publikation/industrie-4-0-maturity-index-update-2020/>.
- Schwarzwälder, Hannes (2018):** *Ein Organisationsmodell zur Steuerung und Regelung der Digitalisierung von Unternehmen in der Bauwirtschaft*. Dissertation, Darmstadt, Technische Universität Darmstadt.
- Sehgal, Naresh Kumar & Bhatt, Pramod Chandra P. (2018):** *Cloud Computing*, Cham: Springer International Publishing.

- Shen, Xuemin; Lin, Xiaodong; Zhang, Kuan (2020):** *Encyclopedia of Wireless Networks*, 1. Aufl., Cham: Springer International Publishing; Imprint Springer.
- Stachowiak, Herbert (1973):** *Allgemeine Modelltheorie*, Wien: Springer.
- Stadt Köln:** *Sanierung der Mülheimer Brücke*, 08.07.2022, online verfügbar unter <https://www.stadt-koeln.de/leben-in-koeln/planen-bauen/bruecken/62461/index.html#>.
- Statistisches Bundesamt (Destatis):** *WISTA – Wirtschaft und Statistik*.
- Stöckl & Hofstadler (2021):** *Neuronale Netze im Baubetrieb und in der Bauwirtschaft*, in *Agile Digitalisierung im Baubetrieb*, Christian Hofstadler, Christoph Motzko, ed. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 129–49.
- Svaricek, Ferdinand (2012):** *Digitale Regelung*. Vorlesung, München, Universität der Bundeswehr München.
- Syben, Gerhard (2018):** *Bauen 4.0 und die Folgen für die Arbeit in Bauunternehmen*, WSI-Mitteilungen, 71 (3), 196–203.
- Tao, Fei; Cheng, Jiangfeng; Qi, Qinglin; Zhang, Meng; Zhang, He & Sui, Fangyuan (2018):** *Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 94 (9-12), 3563–76.
- Tariq, et al. (2019):** *A Speculative Study on 6G*.
- Thommen, Jean-Paul (2008):** *Lexikon der Betriebswirtschaft: Managementkompetenz von A bis Z*, 4. Aufl., Zürich: Versus Verl.
- Ulrich (1985):** *Von der Betriebswirtschaftslehre zur Systemorientierten Managementlehre*, in *Betriebswirtschaftslehre als Management- und Führungslehre*, Rolf Wunderer, ed. Stuttgart: Poeschel.
- Ulrich & Hill (1979):** *Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre*, in *Wissenschaftstheoretische Grundfragen der Wirtschaftswissenschaften*, Hans Raffée, Bodo Abel, ed. Vol. 5. München: Vahlen, 304–09.
- Walter, Hildebrand (2019):** *Zustandsregelung*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Weil, Pia (2022):** *Ein Beitrag zur Anwendung der Lean Construction im schlüsselfertigen Hochbau*. Dissertation, Darmstadt, Technische Universität Darmstadt.

- Werner, Andreas; Angadi, Veerendra C.; Lentjes, Joachim & Mousavi, Alireza (2020):** *Vorausschauende Instandhaltung – Wenn der Digitale Schatten an seine Grenzen stößt*, Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 115 (5), 335–39.
- Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik WGP e. V. (2016):** *WGP-Standpunkt Industrie 4.0*.
- Włodarczyk (2022):** *Mensch versus Maschine? Herausforderungen und Chance von Industrie 4.0: im Hinblick auf die Optimierung der Produktion und personeller Ressourcen*, 29.05.2022, online verfügbar unter <https://www.comarch.de/service-und-support/whitepaper-und-webcasts/whitepaper-herausforderungen-und-chancen-fuer-industrie-40/>.

Anhang

Übersicht der Ergebnisse aus der qualitativen Inhaltsanalyse

Thema	Reduktion	Gewichtung
RQ1	Manuelle Datenverarbeitung führt zu hohem Arbeitsaufwand	10
	Manuelle Datenhaltung und -pflege führt zu fehlerhaften Daten	9
	Es fehlen zentrale Standards	5
	Automatisierte Prozesse erleichtern und beschleunigen die Dateneingabe und -pflege	5
	Menschen sind eine hohe Fehlerquelle. Prozesse müssen mehr automatisiert werden.	5
RQ2	Aktuell besteht ein sehr hoher zeitlicher und personeller Aufwand für die Eingabe, Pflege und Auswertung von Daten im Projektcontrolling, was zu sehr hohen Kosten führt	41
	Prozesse sind teils zu komplex, um alle verstehen zu können. Daher müssen sie automatisiert und von zentraler Stelle standardisiert werden.	33
	Die verwendete Software ist veraltet und genügt nicht mehr den notwendigen Anforderungen an die Datentransparenz	21
	Polysensorale Aufnahme oder automatisierte Dateneingabe ermöglichen das Erfassen zusätzlicher Informationen in kürzerer Zeit ohne Informationsverlust	14
	Neuentwicklungen oder Software im Allgemeinen werden nicht adäquat eingeführt	13
	Erfahrenes Personal muss für die Generierung von Standards herangezogen werden, die nicht zu eng gestrikt sein dürfen, sondern gewisse Freiheitsgrade aufweisen müssen	7
	Daten sollten auf Basis einer zentralen Datenhaltung über Methoden der Künstlichen Intelligenz aufgenommen, interpretiert und verarbeitet werden (Vergleich zu Google Algorithmen)	7
	Trotz vorhandener Handbücher werden neuere Prozesse nicht genutzt bzw. Personal kann mit Software nicht umgehen	7
	Personal muss durch technische Möglichkeiten in seiner Arbeit unterstützt werden, um dem jeweiligen "Kerngeschäft" wieder nachkommen zu können	7
	Personen geben nur die notwendigsten Daten ins System ein, daher muss die Aufnahme automatisiert erfolgen	5
	Es werden nicht ausreichend Steuerungsgespräche geführt. Und wenn doch, ist der Teilnehmerkreis alternierend und ineffizient	4

	Aufgrund mangelhafter Datenpflege sind benötigte Daten nur schwierig zu finden	3
	In den Projekten wird kaum die Arbeitskalkulation durchgeführt, da sie zu zeitaufwändig ist	3
	Daten sind wegen manueller Eingabe teils inkonsistent und nicht nachvollziehbar	3
	Das Projektpersonal muss sich mit zu vielen unbedeutenden Themen beschäftigen.	3
	Es entstehen zu hohe Kosten für nicht wertschöpfendes Personal, was zu weniger erfolgreichen Projekten führt	3
	Aufgrund von inkonsistenten Daten und intransparenter Dateneingabe können Prognosen nicht sinnvoll erstellt werden	2
	Ergebnisse oder Maßnahmen aus Steuerungsgesprächen können nicht zeitnah umgesetzt werden, da nachträglich noch Informationen einbezogen werden müssen	2
	Die Betreuung des Bauherrn ist teils der größte zeitliche Aufwand der Bauleitung	1
	Die Arbeitsvorbereitung ist nicht ausreichend detailliert	1
RQ3	Steuerungsmaßnahmen haben keine Wirkung, da sie zu spät oder gar nicht eingeleitet werden	9
	Durch die Einbeziehung von Experten in Steuerungsgespräche können Entscheidungen früher und effizienter getroffen werden	5
	Ein negativer Projektverlauf wird teils erst zu spät erkannt, da die Informationen aus Steuerungsmechanismen ungenügend sind	4
	Entscheidungsprozesse dauern zu lange	2
	Obwohl Kontrollmechanismen existieren, werden keine Konsequenzen gezogen	1
	Für Steuerungsmaßnahmen notwendige Informationen werden nicht ausreichend aufbereitet und daher nicht adäquat umgesetzt	1
	Durch ausbleibende Steuerung entstehen hohe Kosten	1
	Im Controlling-Prozess erkannte Probleme sollten frühestmöglich an die Ausführung weitergeleitet werden	1
RQ4	Daten müssen weitestgehend automatisiert aufgenommen, interpretiert und verarbeitet werden, da viele Personen manuelle Eingaben lediglich auf das Nötigste reduzieren	18
	Prozesse im Projektcontrolling müssen standardisiert werden und auf einer gemeinsamen Datengrundlage basieren	3
	Methoden der Künstlichen Intelligenz würden die Datenverarbeitung auf Baustellen verbessern und konsistente Prognosen ermöglichen	3
	Datenpflege und Datenhaltung sind für einen erfolgreichen Projektverlauf wichtig	2

Dissertationen des Instituts für Baubetrieb der Technischen Universität Darmstadt

Jahr	Verfasser	Referent und Korreferent	Titel der Dissertation
2022	Christopher Kosel	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Christian Hofstadler	Ein Beitrag zur Prozessautomatisierung im Bauprojekt-Controlling
2022	Ashleika Adelea	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Christian Hofstadler	A Work Process Analysis for Facility Management Standards in Upstream Oil and Gas Sector of Republic of Indonesia
2021	Pia Bernadette Weil	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Christian Hofstadler	Ein Beitrag zur Anwendung der Lean Construction im schlüsselfertigen Hochbau
2021	Jan Schumann	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Christian Hofstadler	Wechselwirkungen von Baulogistik und Bauproduktion im Fassadenbau
2021	Daniel Blesinger	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Christian Hofstadler	Ein Beitrag zur Prozessverbesserung bei Abbruch- und Beräumungsarbeiten
2021	Nathalie Raynaud-Duprospert	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Linke	Entwicklung einer Entscheidungshilfe für PPP-Pflegeheimprojekte in Deutschland und Frankreich
2019	Daniela Linnebacher	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Christian Hofstadler	Wissensmanagement in der Sichtbetontechnologie
2018	Hannes Schwarzwälder	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Christian Glock	Ein Organisationsmodell zur Steuerung und Regelung der Digitalisierung von Unternehmen in der Bauwirtschaft
2018	Xiufeng Xue	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Xing Gao	Knowledge an BIM based Construction Safety Management for Assembly Processes
2016	Martin Westerkamp	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Johann-Dietrich Wörner	Ein Beitrag zur Professionalisierung des Managements von Verbundforschungsprojekten

Jahr	Verfasser	Referent und Korreferent	Titel der Dissertation
2016	Daniel Schmitz	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Christian Hofstadler	Ein Beitrag zur Integration von Weiterbildung in das Arbeitssystem der Bauleitung eines Bauunternehmens
2016	Stefan Kaiser	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Christian Hofstadler	Soll-Ist-Vergleich von Arbeitssystemen im Stahlbetonbau als Beitrag für den Sicherheits- und Gesundheitsschutz
2016	Fabian Ruhl	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Detlef Heck	Entwicklung eines Baulogistikprozessmodells
2016	Jan Wöltjen	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Christian Hofstadler	Ein Beitrag zur ökologischen Bewertung von Abbruchverfahren im Hochbau
2016	Henrik Lorenz	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Wolfdietrich Kalusche	Entscheidungshilfe für altersgerechte Immobilienlösungen für Kommunen
2014	Rigbert Fischer	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Christian Hofstadler	Eine Untersuchung zur roboterbasierten Baugruppenfertigung im Stahlbau
2014	Lars Scheidecker	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Christian Hofstadler	Ein Referenzmodell für das Real Estate Investment Management
2014	Christian Vieth	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr. Ing. Eberhard Schubert	Die baubetrieblichen Auswirkungen des Anordnungsrechtes des Auftraggebers bei Abschluss und Abwicklung von Bauverträgen
2014	Florian Binder	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Christian Hofstadler	Ereignisbasierte Steuerung baulogistischer Prozesse mit Echtzeit-Ortungssystemen
2013	Michael Löhr	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr. Ing. Eberhard Schubert	Planung bei Abbrucharbeiten
2013	Jörg Dohrenbusch	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Peter Racky	Bewertung der Vergabepaxis bei komplexen Großprojekten im deutschen Verkehrsinfrastrukturbau
2013	Jörg Kaiser	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Rainard Osebold	Lean Process Management in der operativen Bauabwicklung

Jahr	Verfasser	Referent und Korreferent	Titel der Dissertation
2013	Erik Boska	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Assoc.-Prof. Dr. techn. Dipl.-Ing. Christian Hofstadler	Gestaltung von Arbeitssystemen in der Sichtbetontechnik
2013	Sandra Sondermann	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko	Prozessorientierter Nachweis von Produktivitätsverlusten auf Baustellen
2013	Svetlana Kometova	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Linke	Controlling langfristiger Projekte im kommunalen Immobilienmanagement – Eine multikategoriale Gestaltungsanalyse und Konzeption
2012	Alexander Nolte	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Volkhard Franz	Ein Beitrag zur effizienten Steuerung des Einsatzes von Schalungsmietgeräten auf Baustellen
2012	Julia Schömbbs	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Ludger Lohaus	Zu den Einflussgrößen auf das Erscheinungsbild und zu den Kosten von Sichtbeton
2011	Leif Pallmer	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht	Ein Prozessmodell zur Qualitätsverbesserung der Brandschutzplanung einer Immobilie
2011	Oliver Mehr	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Volkhard Franz Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schwarz	Polysensorale Bauprozessidentifikation durch kognitive Systeme
2011	Ulrich Dölzig	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Risikoallokation bei Parkgaragen im Rahmen von Public Private Partnership
2010	Jan Philipp Koch	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Rainer Wanninger	Integrale Planungsprozesse – Generalistische Handlungsstrategien für komplexe Problemlösungsprozesse in den Zeiten des Klimawandels
2010	Matthias Bergmann	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schwarz	Ergonomiegestützte Multiagenten-Simulation von Montageprozessen im Baubetrieb
2010	Ingo Giesa	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Rainer Wanninger	Prozessmodell für die frühen Bauprojektphasen
2009	Nils Hinrichs	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Linke	Strategien der öffentlichen Hand – Ein kompetenzorientierter Ansatz aus Sicht des Immobiliencontrollings

Jahr	Verfasser	Referent und Korreferent	Titel der Dissertation
2009	Carola Maffini	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Konfliktbehandlung in Bauprojektorganisationen
2009	Markus Demmler	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Detlef Heck	Risikomanagement im internationalen Tunnelbau unter Anwendung der Vertragsform FIDIC Red Book
2008	Christoph Pflug	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. habil. Harald Schlemmer	Ein Bildinformationssystem zur Unterstützung der Bauprozesssteuerung
2008	Jens Elsebach	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Bauwerksinformationsmodelle mit vollsphärischen Fotografien – Ein Konzept zur visuellen Langzeitarchivierung von Bauwerksinformationen
2007	Falk Huppenbauer	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Nachunternehmermanagement: Die Entwicklung eines prozessorientierten Entscheidungsmodells für die Beschaffung und das Controlling
2007	Ali Akbar Elahwiesy	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Multiprojektmanagement für Infrastruktur-Bauprojekte
2007	Torsten Fetzner	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Ein Verfahren zur Erfassung von Minderleistungen aufgrund witterungsbedingter Bauablaufstörungen
2007	Christopher Cichos	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Untersuchungen zum zeitlichen Aufwand der Baustellenleitung
2007	Jörg Klingenberg	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Detlef Heck	Ein Beitrag zur systematischen Instandhaltung von Gebäuden
2006	Helmuth Duve	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Entscheidungshilfe zur Auswahl eines geeigneten Streitregulierungsverfahrens für das Bauwesen unter besonderer Berücksichtigung baubetrieblicher Aspekte
2006	Julia Schultheis	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Public Private Partnership bei Stadthallen – Rahmenbedingungen und Gestaltungsmöglichkeiten in Deutschland

Jahr	Verfasser	Referent und Korreferent	Titel der Dissertation
2006	Markus Stürmer	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Beitrag zum Qualitätsmanagement im vorbeugenden baulichen Brandschutz – Untersuchung von ausgewählten Brandschutzmängeln der Ausführungsphase
2005	Ingo Goldenberg	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Optimierung von Supply Chain Prozessen in der Bauwirtschaft durch mobile Technologien und Applikationen
2005	Jörg Huth	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Baubetriebliche Analyse von selbstverdichtendem Beton
2005	Joachim Ruß	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Ausführungsdauern und Kapazitätsplanung von Bauleistungen im Organisierten Selbstbau
2004	Shervin Haghsheno	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Analyse der Chancen und Risiken des GMP-Vertrags bei der Abwicklung von Bauprojekten
2004	Detlef Heck	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko	Entscheidungshilfe zur Anwendung von Managementsystemen in Bauunternehmen
2004	Carsten Toppel	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner	Technische und ökonomische Bewertungen verschiedener Abbruchverfahren im Industriebau
2004	Karl Bangert	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko	Untersuchungen zum Einsatz von mit Seilen geführten Lastballon-Kransystemen (LTA Kran-Systeme) im Bauwesen
2002	Torsten Ebner	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Bauen im Bestand bei Bürogebäuden
2002	Patrick Büttner	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko	Abbruch von Stahlbeton und Mauerwerksbauten – Entwicklung einer Entscheidungshilfe zur Auswahl von Hydraulikbaggern
2002	Marc Heim	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Die zeitnahe Leistungsfeststellung von Baustellen unter besonderer Berücksichtigung von Bildinformationssystemen

Jahr	Verfasser	Referent und Korreferent	Titel der Dissertation
2002	Alexander Glock	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko	Technisch-wirtschaftliche Untersuchung luftschiffbasierter Schwerlastlogistik im Bauwesen
2001	Alexander Bubenik	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Die Fassade und ihr Einfluss auf die schlüsselfertige Bauausführung
2001	Theresa Pokker	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko	Kalkulation von Erdarbeiten in kontaminierten Bereichen
2001	Frank Müller	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Marktstrategische Fremdvergabe unter Berücksichtigung entscheidungsrelevanter Einflusskriterien
2001	Markus Werner	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Einsatzdisposition von Baustellenführungskräften in Bauunternehmen
2000	Bernhard Griebel	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Gerhard Girmscheid	Der zeitnahe Soll-Ist-Vergleich aus Sicht der Baustelle
2000	Dirk Mayer	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Entscheidungshilfe für die Beurteilung von Fußbodensystemen im Hochbau
1999	Patrik Loschert	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko	Terminmanagement im schlüsselfertigen Hochbau
1999	Katja Silbe	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko	Wirtschaftlichkeit kontrollierter Rückbauarbeiten
1999	Heinrich Wengerter	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko	Rationalisierungsmöglichkeiten im Mauerwerksbau durch eine robotergestützte Wandvorfertigungsanlage
1997	Achim Hitzel	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko	Ein Entscheidungsunterstützungssystem für das Instandhaltungsmanagement der Bundesfernstraßenbrücken
1997	Peter Racky	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko	Entwicklung einer Entscheidungshilfe zur Festlegung der Vergabeform
1996	Carsten Dorn	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr. jur. Klaus Vygen	Systematisierte Aufbereitung von Dokumentationstechniken zur Steuerung von Bauabläufen und zum Nachweis von Bauablaufstörungen

Jahr	Verfasser	Referent und Korreferent	Titel der Dissertation
1995	Egbert Keßler	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Thomas Bock	Rationalisierung im Schalungsbau durch Einsatz von Robotern
1995	Hermann Kraft	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. e.h. Gert König	Steuerung und Entwicklung von Brückenerhaltungsmaßnahmen
1995	Friedo Mosler	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. e.h. Gert König	Wirtschaftliche Instandhaltung von Betonaußenbauteilen
1994	Stefan Plaum	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Lühr	Umweltrelevante organisatorische Anforderungen an Betriebe der Bauwirtschaft – Lösungsmöglichkeiten, aufgezeigt am Beispiel der Baurestmassenbehandlung
1994	Boming Zhao	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Volker Kuhne	Ein Verfahren zur Entwicklung eines wissensbasierten Planungssystems für die Terminplanung von Rohbauprojekten im Hochbau
1993	Hellwig Kamm	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Reinhard Seeling	Materialwirtschaftliche Steuerung im Baubetrieb – Analyse und Verbesserung baubetrieblicher Beschaffungsvorgänge
1991	Henning Hager	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Claus Jürgen Diederichs	Untersuchung von Einflussgrößen und Kostenänderungen bei Beschleunigungsmaßnahmen von Bauvorhaben
1991	Michael Hölzgen	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. e.h. Gert König	Erhaltungskosten von Brücken
1990	Dirk Reister	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr. rer. pol. Karl Robl	Entwicklung eines Verfahrens zur projektübergreifenden Personaleinsatzoptimierung
1989	Gerd Bergweiler	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Eberhard Petzschmann	Strukturmodell zur Darstellung und Regeneration von Kalkulationsdaten
1989	Lothar Forkert	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. e.h. Gert König	Verfahren zur Prognose von Schadensentwicklungen bei einer kostenoptimierten Brückeninstandhaltung

Jahr	Verfasser	Referent und Korreferent	Titel der Dissertation
1989	Christoph Motzko	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dipl.-Ing. Klaus Simons	Ein Verfahren zur ganzheitlichen Erfassung und rechnergestützten Einsatzplanung moderner Schalungssysteme
1989	Lothar Ruf	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dipl.-Ing. Hansjakob Führer	Integrierte Kostenplanung von Hochbauten
1988	Karl Rose	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. e.h. Gert König	Kosten der Erhaltung von Brückenbauwerken
1987	Andreas Lang	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Hans-Gustav Olshausen	Ein Verfahren zur Bewertung von Bauablaufstörungen und Projektsteuerung
1986	Lothar Krampert	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. e.h. Gert König	Der Einfluss von Arbeitseinsatz und Arbeitstakt auf die Kosten von Hochbauten in Ortbeton
1985	Herrmann Keßler	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Wolfram Keil	Der Plan Soll-Ist-Vergleich mit einem Nachweis zeitvariabler Kostenänderung bei einer Bauzeitverschiebung