

Tino Walther

Schriften der Professur Baubetrieb und Bauverfahren

43 | 2023

# Ein Modell zur Optimierung der Bauleistungsfeststellung von Linienbaustellen

## Impressum

Schriften der Professur Baubetrieb und Bauverfahren

Herausgeber

© Bauhaus-Universität Weimar

Fakultät Bauingenieurwesen

Professur Baubetrieb und Bauverfahren

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Melzner

Marienstraße 7A

D-99423 Weimar

Tel.: (+49) 03643/584585

Bezugsmöglichkeit

Blueprint. edition/ galerieverlag

ISBN: 978-3-96567-091-4

Druck

Blueprint. druck + medien gmbh

Der Volltext dieser Publikation ist abrufbar unter folgender DOI:

<https://doi.org/10.25643/bauhaus-universitaet.4911>

Jahr der Ersterscheinung: 2023

---

# **Ein Modell zur Optimierung der Bauleistungsfeststellung von Linienbaustellen**

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

an der Fakultät Bauingenieurwesen

der

BAUHAUS-UNIVERSITÄT WEIMAR

vorgelegt von

Tino Walther

M. Sc.

geboren am 14.11.1987 in Friedrichroda, Deutschland

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Bargstädt (Bauhaus-Universität Weimar)

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Rodehorst (Bauhaus-Universität Weimar)

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Dieter Jacob (TU Bergakademie Freiberg)

Tag der Disputation, 16. Dezember 2022

---

## **Vorwort des Herausgebers**

Baupraktiker wissen wie mühsam die turnusmäßige Leistungsmeldung von laufenden Bauvorhaben ist. Meist wendet der Bauleiter zwei bis drei Tage gegen Ende eines Monats auf, um den aktuellen Leistungsstand festzustellen und gerade bei unfertigen Leistungen eine korrekte Abgrenzung der erbrachten gegen die noch offenen Bauleistungen vorzunehmen. Wenn dann das ggf. auch nicht sauber zum Stichtag abgegrenzte Zahlenwerk aus der Buchhaltung dagegen gestellt wird, kommt es schnell einmal zu größeren Ungenauigkeiten in der monatlichen Leistungseinschätzung.

Doch gerade die zutreffende Bauleistungsfeststellung und die aktuell fortgeschriebene Ergebnisrechnung sind die wichtigsten Steuerungsinstrumente, um Fehlentwicklungen im Bauablauf vorzubeugen bzw. rechtzeitig Korrekturmaßnahmen zu ergreifen.

Ein höherer Automatisierungsgrad bei der Bauleistungsfeststellung ist aus zweierlei Gründen erstrebenswert. Erstens erhofft man sich von automatisierten Erfassungsverfahren eine objektive Bestandsaufnahme, die weniger anfällig ist gegenüber unbewussten Verfälschungen oder gar vorsätzlichen Manipulationen. Zweitens kann eine Automatisierung den Bauleiter von ungeliebten Routineaufgaben entlasten und ihm somit notwendige Zeit verschaffen, die er in die Plausibilitätsprüfung der aus mehreren Quellen zusammengestellten Baustellenergebnisse investiert.

An der Professur Baubetrieb und Bauverfahren befasste sich Herr Walther in der vorliegenden Dissertation mit der automatisierten Leistungserfassung von ausgedehnten Linienbaustellen. Er beschreibt und entwickelt ein automatisiertes Verfahren der schichtgenauen Ist-Aufnahme mittels Punktwolke per UAV-System sowie einer plausibilitätsgestützten Auswertung.

Mit seiner Arbeit hat Herr Walther damit einen leistungsfähigen Ablauf entwickelt, der unter Nutzung modernster Erfassungsverfahren zu schnelleren und besseren Ergebnissen bei der Leistungserfassung von Linienbaustellen mit schichtenartigem Aufbau führt, also typischerweise bei Straßen- und Bahntrassen. Dass die Ergebnisse der Dissertation bereits Eingang finden bei der Steuerung von realen Infrastrukturprojekten, zeigt, dass die Ansätze und Verfahren in der Arbeit von Herrn Walther eine bestehende Forschungslücke auf innovative Weise geschlossen haben.

Wir wünschen allen Leserinnen und Lesern dieser Arbeit einen hohen Erkenntnisgewinn und eine ansprechende Lektüre. Insbesondere freuen wir uns mit Herrn Walther und seinen Forschungskollegen, dass die Arbeit dazu beiträgt, weiter konsequent an der Verbesserung der Bau-Ist-Aufnahme in Forschung und Praxis zu arbeiten und somit die Digitalisierung der Bauprozesse weiter zu beschleunigen.

Weimar, im Dezember 2022

**Jürgen Melzner**

Leiter der Professur  
Baubetrieb und Bauverfahren

**Hans-Joachim Bargstädt**

Seniorprofessor an der  
Professur Baubetrieb und Bauverfahren

Bauhaus-Universität Weimar

## **Vorwort des Autors**

Die vorliegende Dissertationsschrift entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter der Professur Baubetrieb und Bauverfahren der Bauhaus-Universität Weimar.

Eine wesentliche Motivation bestand darin, die in der Bauausführungsphase entstehenden Fortschritte kontinuierlich aufzuzeigen und einer objektiven Leistungsbewertung zuzuführen. Geprägt wurde dieses Themenfeld während der langjährigen Tätigkeit als Projekt- und Bauleiter im Infrastrukturbau. Kontinuierlich entstehende Daten und Informationen sollen in der Praxis besser genutzt werden können und einen effizienten Prozess innehaben.

Mein Dank gilt meinem Mentor Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Bargstädt, der dem Thema sehr offen gegenüberstand und mich mit seiner vielfältigen praktischen und wissenschaftlichen Erfahrung sowie Herangehensweise im Bereich des baubetrieblichen Projektcontrollings unterstützt hat. Des Weiteren möchte ich mich ausdrücklich für die stete Unterstützung durch meine Familie und meine Freunde bedanken.

Einen weiteren Dank richte ich an all meine Kolleginnen und Kollegen an der Professur Baubetrieb und Bauverfahren für die gemeinsame anregende Zeit. Ebenfalls danken möchte ich für die Unterstützung durch einen langjährigen Kooperationspartner, der Eurovia GmbH/VIA IMC GmbH, ohne die die Erstellung dieser Arbeit nicht möglich gewesen wäre sowie allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern seitens dieser Kooperation. Weiterhin danke ich allen Studierenden, die im Rahmen diverser Abschluss- und Projektarbeiten wertvolle Beiträge zu dieser Arbeit geleistet haben.

Weimar, im Juni 2022

Tino Walther

---

## Inhaltsübersicht

<b>Vorwort des Herausgebers .....</b>	<b>3</b>
<b>Vorwort des Autors .....</b>	<b>4</b>
<b>Inhaltsübersicht.....</b>	<b>5</b>
<b>Kurzfassung .....</b>	<b>6</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>7</b>
<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>8</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>12</b>
<b>Genderhinweis.....</b>	<b>14</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>15</b>
<b>2 Stand der Forschung .....</b>	<b>23</b>
<b>3 Empirische Studie.....</b>	<b>57</b>
<b>4 Priorisierte Anforderungen.....</b>	<b>84</b>
<b>5 Lösungsmodell zur Optimierung der Bauleistungsfeststellung .....</b>	<b>102</b>
<b>6 Validierung und prototypische Überprüfung der Anwendbarkeit.....</b>	<b>128</b>
<b>7 Zielabgleich zum Modellansatz .....</b>	<b>139</b>
<b>8 Schlussbetrachtung.....</b>	<b>144</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>148</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>165</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>167</b>
<b>Anlagenverzeichnis (separater Druckband).....</b>	<b>168</b>

## Kurzfassung

Das Wissen um den realen Zustand eines Bauprojektes stellt eine entscheidende Kernkompetenz eines steuernden bauausführenden Unternehmens dar. Der bewusste Umgang mit Informationen und deren effiziente Nutzung sind entscheidende Erfolgsfaktoren für die zeit-, kosten- und qualitätsgerechte Realisierung von Bauprojekten.

Obwohl die erforderlichen Erfolgsfaktoren bekannt sind, sind Kosten- und Terminüberschreitungen von Bauprojekten keine Seltenheit – eher das Gegenteil ist der Fall. Zukunftsweisende Digitalisierungsprojekte aber geben Anlass zu Hoffnung. Ein Beispiel ist der bereits im Dezember 2015 vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur ins Leben gerufene Stufenplan *Digitales Planen und Bauen*. Dieser hat die Aufgabe flächendeckend die Methodik des Building Information Modeling (BIM) im Infrastrukturbereich einzuführen und somit die Digitalisierung in Deutschland zukunftsweisend voranzutreiben, indem erfolgreiche Bauprojekte mit durchgängigen Informationsflüssen arbeiten. Seither existiert eine Vielzahl an Digitalisierungsprojekten, alle mit gleichen Zielen. Nachweislich lassen sich hinsichtlich dessen allerdings auch vermehrt Defizite aufzeigen. So ist der Fortschritt sehr heterogen verteilt und lässt sich für die Branche nicht allgemeingültig festlegen.

Mit einer internationalen Literaturrecherche sowie einer empirischen Studie als Untersuchungsmethode wurde in Form von Interviews mit Fachkundigen der tatsächliche Zustand der Digitalisierungs- und der BIM-Anwendungen im Straßenbau für den Controllingprozess der Bauleistungsfeststellung untersucht. Die erhobenen Daten wurden aufbereitet und anschließend softwaregestützt einer inhaltlichen Analyse unterzogen. In Kombination mit den Ergebnissen der Literaturrecherche wurden notwendige Anforderungen für den Controllingprozess der Bauleistungsfeststellung erhoben. Auf dieser Grundlage wurde ein Modell im Sinne der Systemtheorie zur Optimierung der Bauleistungsfeststellung entwickelt.

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Integration der modellbasierten Arbeitsweise in die Prozesse der Bauleistungsfeststellung eines Bauunternehmens. Grundlage ist die objektive Auswertung des Fertigstellungsgrades (Baufortschrittes) mittels Luftbilddaufnahmen. Deren Auswertung auf Basis eines Algorithmus und die systematische Identifikation des Baufortschrittes integriert in den Prozess der Bauleistungsfeststellung werden zu einem neu entwickelten Gesamtsystem mit dem Ergebnis eines optimierten Modells.

Das entwickelte Modell wurde hinsichtlich Anwendbarkeit und praktischer Relevanz an ausgewählten Beispielszenarien untersucht und nachgewiesen.

## Abstract

The knowledge of the real-time condition of a construction project represents a decisive core competence of a controlling construction company. The conscious handling and efficient use of information can contribute to and be decisive success factors for the timely, cost-efficient, and high-quality realization of construction projects.

Despite the knowledge of the necessary success factors, cost and schedule overruns of construction projects are not uncommon, rather the opposite. Hope is shown by forward-looking digitalization projects. The implementation plan for digital planning and construction launched in December 2015 by the Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure. Its task is to introduce the Building Information Modelling (BIM) methodology across the board and to drive forward digitization in the entire construction industry and generate successful construction projects with a continuous flow of information. Since then, there have been numerous digitization projects, all with the same goal. However, it has been proven that there are also increasing deficits. For example, progress is very heterogeneously distributed, and it is not possible to make a general statement for the industry.

Based on an international literature investigation and an empirical study as the underlying research method, the actual state of digitalization and BIM applications in road construction for the controlling process of construction performance assessment was examined in the form of qualitative interviews with professionals. The collected data was processed and then subjected to a software-based content analysis. Furthermore, a model was developed in the sense of the system theory for optimizing the construction performance assessment based on the previous research.

The integration of the model-based determination of the construction performance of a construction company is the subject of this dissertation. The basis is the objective evaluation of the degree of completion (construction progress) by means of aerial photographs. The model- and algorithm-based evaluation of the construction progress combined with the systematic integration in the process of the construction performance assessment becomes a newly developed overall system with the result of an optimized model.

The developed model was examined and proven regarding applicability and practical relevance in selected example scenarios.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>12</b>
<b>Genderhinweis.....</b>	<b>14</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>15</b>
1.1 Ausgangssituation und Motivation.....	15
1.2 Problemstellung.....	16
1.3 Zielsetzung der Arbeit.....	17
1.4 Einordnung und Abgrenzung der Arbeit.....	18
1.5 Forschungsmethodik.....	19
1.6 Struktur der Arbeit.....	21
<b>2 Stand der Forschung .....</b>	<b>23</b>
2.1 Grundlagen und Begriffe.....	23
2.1.1 Controlling.....	23
2.1.2 Projektcontrolling.....	24
2.1.3 Abgrenzung Bauprojektcontrolling/ Baustellencontrolling .....	25
2.1.4 Leistungsmeldung im Baustellencontrolling .....	26
2.1.5 Methoden der Leistungsermittlung.....	27
2.1.6 Soll-Ist-Vergleiche im Baustellencontrolling .....	32
2.1.7 Methoden der Leistungserfassung.....	35
2.2 Modellbasierte Projektabwicklung.....	38
2.2.1 Basis der Objekt- und Datenmodellierung .....	38
2.2.2 Geometrische und parametrische Modellierung.....	38
2.2.3 Metadaten.....	39
2.2.4 Datenschnittstellen und Interoperabilität.....	40
2.2.5 Modellbasierte Arbeitsmethodik.....	41
2.2.6 Multimodellkonzept.....	41
2.2.7 BIM in der Ausführungsphase ausführender Tief- und Straßenbauunternehmen.....	44
2.3 Erfassungsmethoden des IST-Zustandes .....	46
2.3.1 Objektidentifikation .....	48
2.3.2 Bauteilidentifikation .....	49
2.3.3 Identifizierung anhand von Ortung.....	52
2.4 Modell- und Prozessintegration.....	54

2.4.1	Modellentwicklung .....	54
2.4.2	Prozessdarstellung .....	55
2.5	Schlussfolgerung und Bewertung .....	55
<b>3</b>	<b>Empirische Studie .....</b>	<b>57</b>
3.1	Forschungsdesign und Datenerhebung .....	57
3.1.1	Fragestellung .....	58
3.1.2	Erhebung.....	59
3.1.3	Auswertung der Daten.....	61
3.2	Ausprägungen der Bauleistungsfeststellung und Leistungsmeldung.....	63
3.2.1	Leistungserfassung .....	64
3.2.2	Prozess der Leistungsmeldung .....	68
3.2.3	Soll-Ist-Vergleiche .....	70
3.3	Digitale Ansätze der Bauleistungsfeststellung und Leistungsmeldung .....	72
3.3.1	Leistungserfassung .....	73
3.3.2	BIM.....	77
3.3.3	Vollautomatische Abweichungsanalyse.....	79
3.4	Ausblick der Bauleistungsfeststellung und Leistungsmeldung.....	79
3.4.1	Ausblick.....	80
3.4.2	Persönliche Meinungen zur Digitalisierung .....	82
<b>4</b>	<b>Priorisierte Anforderungen.....</b>	<b>84</b>
4.1	Vorgehen.....	84
4.2	Methodische und qualitätsbezogene Anforderungen .....	87
4.2.1	Leistungserfassung .....	87
4.2.2	Leistungsmeldung .....	88
4.3	Anforderungen an den Prozess .....	90
4.3.1	Prozessgestaltung.....	90
4.3.2	Prozessintegration.....	93
4.4	Funktionale Anforderungen.....	94
4.4.1	Eingabe der Daten .....	94
4.4.2	Datenverarbeitung.....	95
4.4.3	Ausgabe der Daten .....	97
4.5	Nichtfunktionale Anforderungen.....	97
4.5.1	Benutzerfreundlichkeit.....	97
4.5.2	Informationsaufbereitung.....	98

4.6	Quantitative Auswertung.....	99
<b>5</b>	<b>Lösungsmodell zur Optimierung der Bauleistungsfeststellung .....</b>	<b>102</b>
5.1	Lösungsansatz.....	102
5.2	Zielsystem .....	102
5.3	Produktsystem .....	104
5.4	Handlungsträgersystem .....	105
5.5	Handlungssystem .....	106
5.5.1	Prozess der Leistungserfassung im Handlungssystem.....	109
5.5.2	Prozess Leistungsermittlung des Handlungssystems .....	111
5.5.3	Prozess Leistungsmeldung des Handlungssystems .....	123
5.6	Systemzusammenhang und integrierte Datenverarbeitung innerhalb des Modells	125
5.7	Zusammenfassende Beschreibung.....	126
<b>6</b>	<b>Validierung und prototypische Überprüfung der Anwendbarkeit.....</b>	<b>128</b>
6.1	Validierung des aufgestellten Modells.....	128
6.2	Prototypische Überprüfung der Anwendbarkeit am Beispiel.....	129
6.2.1	Erfassung und Auswertung des Fertigstellungsgrades zur Integration der modellbasierten Bauleistungsfeststellung .....	129
6.2.2	Überprüfung der modellbasierten Anwendbarkeit.....	134
<b>7</b>	<b>Zielabgleich zum Modellansatz .....</b>	<b>139</b>
7.1	Vorgehen.....	139
7.2	Qualitative Bedarfserfüllung .....	139
7.2.1	Erfüllung der methodischen und qualitätsbezogenen Anforderungen .....	140
7.2.2	Erfüllung der Anforderungen an den Prozess .....	140
7.2.3	Erfüllung der funktionalen Anforderungen.....	141
7.2.4	Erfüllung der nichtfunktionalen Anforderungen .....	142
7.3	Quantitative Bedarfserfüllung.....	142
7.4	Abschließender Blick auf die Bedarfserfüllung .....	143
<b>8</b>	<b>Schlussbetrachtung.....</b>	<b>144</b>
8.1	Wissenschaftlicher Beitrag.....	144
8.2	Praktischer Beitrag .....	145
8.3	Handlungsempfehlung .....	146
8.4	Ausblick.....	147
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>148</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>165</b>

<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>167</b>
<b>Anlagenverzeichnis (separater Druckband).....</b>	<b>168</b>
<b>Anlage 1 – Dateninventar Interviews.....</b>	<b>169</b>
<b>Anlage 2 – Leitfragebogen.....</b>	<b>173</b>
<b>Anlage 3 – Ausgangssituation empirische Studie .....</b>	<b>177</b>
<b>Anlage 4 – Kodierungssystem Interviews .....</b>	<b>179</b>
<b>Anlage 5 – Auswertungstabelle Interviews.....</b>	<b>184</b>
<b>Anlage 6 - Anforderungsdatenbank.....</b>	<b>534</b>
<b>Anlage 7 – Vorbereitung der Aufnahme.....</b>	<b>547</b>
<b>Anlage 8 – Durchführung der Aufnahme .....</b>	<b>549</b>
<b>Anlage 9 – Softwarebasierte Bearbeitung der Daten zur grafischen Darstellung.....</b>	<b>551</b>
<b>Anlage 10 – Ableitung synthetischer Punktwolken .....</b>	<b>553</b>
<b>Anlage 11 – Aktualisierung Arbeitskalkulation .....</b>	<b>555</b>
<b>Anlage 12 – Systemübergreifender Prozess der Bauleistungsfeststellung.....</b>	<b>557</b>
<b>Anlage 13 – Evaluierung Bedarfserfüllung.....</b>	<b>559</b>

## Abkürzungsverzeichnis

<b>3D</b>	dreidimensional
<b>AG</b>	Auftraggeber
<b>AGK</b>	Allgemeine Geschäftskosten
<b>ATV</b>	Allgemeine Technische Vertragsbedingungen
<b>BGK</b>	Baustellengemeinkosten
<b>BIM</b>	Building Information Modeling
<b>BPMN</b>	Business Process and Model Notation
<b>E</b>	Ebene
<b>EKT</b>	Einzelkosten der Teilleistungen
<b>EP</b>	Einheitspreis
<b>FB</b>	Fragenbereich
<b>G</b>	Gewinn
<b>GIS</b>	Geoinformationssystem
<b>GNSS</b>	globales Navigationssatellitensystem
<b>GoM</b>	Grundsätze ordnungsgemäßer Modellierung
<b>GPS</b>	Global Positioning System
<b>GSD</b>	Ground Sampling Distance
<b>GUID</b>	Globally Unique Identifier
<b>IFC</b>	Industry Foundation Classes
<b>JSON</b>	JavaScript Notation
<b>K</b>	Kategorie
<b>KI</b>	künstliche Intelligenz
<b>KLR Bau</b>	Kosten-, Leistungs- und Ergebnisrechnung der Bauunternehmen
<b>LE-Menge</b>	Leistungsmenge
<b>MoSCoW</b>	Must, Should, Could, Won't-Prinzip
<b>OKSTRA</b>	Objektkatalog für das Straßen- und Verkehrswesen
<b>PCA</b>	Principal Component Analysis
<b>RFID</b>	Radio Frequency Identification
<b>REB</b>	Reglungen für die elektronische Bauabrechnung
<b>RE-Menge</b>	Rechnungsmenge
<b>SIFT</b>	Scale Invariant Feature Transform
<b>SfM</b>	Structure from Motion
<b>UAV</b>	Unmanned Aerial Vehicle (unbemanntes Luftfahrzeug)
<b>UK</b>	Unterkategorie
<b>VA-Menge</b>	voraussichtliche Ausführungsmenge

**XML**                      Extensible Markup Language

## **Genderhinweis**

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wurde in der vorliegenden Dissertation bei personenbezogenen Hauptwörtern die im Sprachgebrauch übliche Form gewählt. Selbstverständlich beziehen sich die personenbezogenen Angaben auf Angehörige aller Geschlechter (weiblich, männlich, divers).

# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangssituation und Motivation

„Egal um welchen Fachbereich es sich handelt, die Basis für zielgerichtete und effiziente Entscheidungen bilden stets fundierte und aussagekräftige Informationen. Abhängig von der Qualität dieser Daten erhält man ein mehr oder weniger scharfes Bild von der zukünftigen Baustelle (in der Angebotsphase) bzw. des Baufortschritts in der Ausführungsphase.“ (Hoffmann et al., 2019, S. 277)

Der bewusste Umgang mit Informationen und deren effiziente Nutzung sind entscheidende Erfolgsfaktoren für eine zeit-, kosten- und qualitätsgerechte Realisierung von Bauprojekten. Das Wissen über den realen Status eines Bauprojektes stellt eine entscheidende Kernkompetenz eines steuernden bauausführenden Unternehmens dar.

Hinsichtlich des globalen Trends der Digitalisierung ist festzustellen, dass sich zwar die weit überwiegende Zahl der Akteure des Bausektors darüber einig sind, dass die Digitalisierung die Prozesse beeinflussen wird; weniger als 6 % der deutschen Bauunternehmen nutzen aber digitale Instrumente zur ganzheitlichen Analyse. (Vgl. Schober und Hoff, 2016, S. 13) Es wird die Auffassung vertreten, dass weiterhin der Mensch im Mittelpunkt der Bauprozesse sein wird. Gegenwärtig sind circa 60 % der Baukosten direkt und indirekt personalbedingt. Diese Quote wird künftig sinken und die Anforderungen an bauleitendes Personal wird sich entsprechend ändern. Angesichts der demografischen Entwicklung in Europa dürfte sich der konjunkturbedingte bereits festzustellende Engpass an Fachkräften verstetigen. Effizienzgewinne durch Digitalisierung und Automatisierung werden somit weniger als Bedrohung denn als Chance empfunden werden. (Vgl. Birtel, 2019, S. 25) Die Methodik BIM (Building Information Modeling) gewinnt in der Abwicklung von Bauprojekten immer mehr an Bedeutung und verbindet damit eine Methode, in der die Prozesse der Planung, der Bauvorbereitung und Bauüberwachung mithilfe von digitalen Computern unterstützt werden. (Vgl. Bauch und Bargstädt, 2020, S. 491). Lediglich 15 % der Bauunternehmen arbeiten nach der Methode BIM, obwohl die Vorteile bereits bekannt sind. (Vgl. Deutsche Telekom AG/techconsult GmbH, 2021, S. 7; Bauch und Bargstädt, 2020, S. 471 ff.). Trotz der bestehenden Pandemielage seit dem Frühjahr 2020 und der damit verbundenen gewissen Investitionseinschränkungen der Bauunternehmen haben gleichwohl 26 % des Baugewerbes die Notwendigkeit der Digitalisierung und Anwendung der BIM-Methodik erkannt. Sie wollen trotz Pandemie investieren, um u. a. die internen Strukturen und Prozesse effizienter zu gestalten. Des Weiteren zeigt sich in der Entwicklung, dass bereits gut digitalisierte Unternehmen einer Krise besser entgegenwirken können. Sie erwirtschaften mehr Umsatz, können schneller reagieren und wickeln Aufträge schneller ab. (Vgl. Deutsche Telekom AG/techconsult GmbH, 2021, S. 7 ff.)

Es zeigt sich, dass in Zeiten der Digitalisierung und Dynamisierung von Arbeitsplätzen eine Datenverfolgung und -nutzung in der Baubranche unverzichtbar ist. Aufgrund spezifischer interner Anforderungen der Unternehmen bedingt die Anwendung einer objektorientierten Verarbeitung und Nutzung einen erheblichen Anpassungs- und Umsetzungsaufwand. Die

Integration und Neugestaltung der Prozesse eröffnet Potenziale und Forschungsansätze in diesem Bereich.

Das Vorgehen auf herkömmliche Weise mit den weiter steigenden Anforderungen, in der Projektbezogenheit, mit wechselnden Beteiligten, geringen Standardisierungsmöglichkeiten, stetigen Planänderungen etc. ist die Achillesferse einer erfolgreichen Projektsteuerung. (Vgl. Birtel, 2019, S. 23; Walther, 2019, S. 320)

Die Besonderheit bei der Betrachtung im Infrastrukturbau (im Gegensatz zu Optimierungsabsichten bei einem rein privatwirtschaftlichen Interesse) ist das öffentliche Interesse, Bauvorhaben möglichst qualitäts-, zeit- und auch kostengerecht zu realisieren. Das gesellschaftliche Interesse basiert auf der meist späteren Nutzungszuführung dieser Projekte sowie der indirekten Mitfinanzierung durch Steuerzahler, weshalb das Gemeinwohl der Gesellschaft bei öffentlichen Infrastrukturbauvorhaben von bedeutender Relevanz ist.

## **1.2 Problemstellung**

Kosten- und Terminüberschreitungen von Bauprojekten rückten in den vergangenen Jahren vermehrt in den Fokus der öffentlichen Wahrnehmung. Bereits eine Studie aus dem Jahr 2015 verzeichnete für öffentliche Großprojekte in Deutschland im Verkehrsinfrastrukturbereich Kostenüberschreitungen von 33 %. Allein für die untersuchten Straßenbauprojekte stellte sich eine durchschnittliche Kostensteigerung von 27 % ein. (Vgl. Berger, 2015) Nicht aufgezeigt sind meist damit einhergehende und in Relation stehende Verlängerungen der Bauzeit dieser Projekte. Abweichungen zu den Soll-Vorgaben werden meist zu spät erkannt, obwohl das frühzeitige Bemerkens von Fehlentwicklungen explizit ist, um schnell geeignete Gegenmaßnahmen ergreifen zu können und das Planziel trotzdem zu erreichen. Als Lösungsansatz für diese Problematik wird ein objektives Controlling gesehen, welches zudem ein signifikanter Faktor der Wettbewerbs- und Existenzsicherung von Unternehmen ist.

Die Feststellung der tatsächlich erbrachten Leistung während einer Baumaßnahme ist nach Literatur und durchgeführter Umfrage ein aufwendiger und sehr komplexer Prozess, welcher zumeist auf Basis von subjektiven Einschätzungen durch das Baustellenpersonal erfolgt. Hinzu kommen ständig wechselnde Gegebenheiten vor Ort sowie die zunehmend komplexer werdenden Bauvorhaben. Mehr Komplexität verlangt nach mehr beteiligten Spezialisten und Fachkräften. Dem Einsatz von mehr Personal steht jedoch die demografische Entwicklung mit dem Fehlen von Fachkräften entgegen. Ebenso führt mehr Komplexität zu mehr Umplanung, womit das Bau-Soll nicht unbedingt klarer wird. (Vgl. Birtel, 2019, S. 28)

Abhilfe könnten Digitalisierungsansätze oder die Abwicklung nach der BIM-Methodik schaffen. Der Dreiklang von Digitalisierung, Automatisierung und Vernetzung einer kollaborativen Arbeitsweise sind wesentliche Veränderungstreiber. (Vgl. Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V., 2021, S. 6) Jedoch ist deren Fortschritt im Infrastrukturbau, dort spezifisch im Straßenbau, weit von den Entwicklungen entfernt, welche bereits im Hochbau Standard sind. Zum einen werden meist keine digitalen Daten, geschweige denn ein 3D-Modell, von Auftraggebern für weitere BIM-Applikationen und digitale Anwendungen bereitgestellt und zum anderen sind die internen Prozesse der öffentlichen Auftraggeber nicht auf digitale Anwendungen ausgerichtet, weshalb die Auftragnehmer ebenso davon absehen, da dies für sie eine doppelte Belastung wäre. (Vgl. Arbeitskreis Digitalisiertes Bauen, 2019, S. 6) Erst

2019 erschien vom Bauindustrieverband ein Positionspapier zu *BIM im Straßenbau*, welches Missstände und Forderungen für eine Umsetzung mit digitalen Daten aufzeigt. Es fehlt an Standardisierungen, Regelwerke entsprechen nicht mehr dem Standard (unter Einsatz digitaler Anwendungen) und Datenformate müssen für den praktischen Einsatz weiterentwickelt werden. (Vgl. Arbeitskreis Digitalisiertes Bauen, 2019, S. 7 ff.) All dies zeigt den unausgereiften Ansatz der digitalen sowie BIM-Anwendungen im Straßenbau.

Auffallend bez. der Anwendungen im Straßenbau ist, dass dafür die Strukturen des Hochbaus nicht vollends adaptierbar sind und an den Prozess des Straßenbaus erst angepasst werden müssten. Die einfache Meldung („fertig“) des Fertigstellungsgrades eines Bauteiles im Hochbau, lässt sich aufgrund der linienartigen Ausdehnung der Straßenbauobjekte nicht adaptieren. So ist eine Schicht im Straßenbau zwar ein Bauteil, das aber aufgrund des Baufortschrittes in mehrere Teilbereiche geteilt werden müsste – also in stufenlose Kilometrierungseinheiten, wie diese im Straßenbau üblich sind.

Für die erforderliche Datenerfassung, um ein scharfes Bild von der aktuellen Baustelle in der Ausführungsphase zu erhalten, gibt es eine Vielzahl an digitalen Anwendungen. Diese erlauben auf dem jeweiligen Anwendungsgebiet zumeist eine gute Erfassung, lassen sich in den tatsächlichen Prozess jedoch schwer integrieren und bedürfen meist weiterer Experten. Ein umfassender Überblick möglicher Anwendungen ist Omar und Nehdi zu entnehmen. (Vgl. Omar und Nehdi, 2016, S. 146 ff.) Anwendungen im Straßenbau zur Erfassung des tatsächlichen Baufortschrittes sind momentan in Anwendungsreife noch nicht gegeben. Vick und Brilakis zeigen einen Ansatz zur Erkennung des Fortschritts mittels Punktwolken auf. (Vgl. Vick und Brilakis, 2018, S. 1 ff.) Eine Integration und Anwendung in den Prozess der Projektabwicklung ist nicht vorgenommen worden.

### **1.3 Zielsetzung der Arbeit**

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung eines praxisorientierten Ansatzes zur automatisierten Baufortschrittserkennung und Verarbeitung des resultierenden Ergebnisses. Der Ansatz basiert auf der modellgestützten objektiven Abbildung des tatsächlichen Bautenstandes von linienartigen Verkehrsinfrastrukturprojekten während der Bauausführung. Die Erfassung der dafür benötigten Daten stellt die Basis dar, um im BIM-Modell verwaltet und dargestellt werden zu können. Eine vertiefte Kenntnis der technologischen und methodischen Zusammenhänge des Straßen- und Tiefbaus ist dazu Voraussetzung.

Im Rahmen der Untersuchung sollen branchenspezifische Anforderungen für einen automatisierten Ansatz zum Abbild des tatsächlichen Leistungsstandes einer Baumaßnahme zusammengestellt und bestehende Ansätze spezifisch für den Untersuchungskontext weiterentwickelt werden. Im Ergebnis wird ein automatisiertes Konzept entwickelt, das beschreibt, wie notwendige Daten und Informationen im bauausführenden Prozess des Straßen- und Tiefbaus systematisch erhoben, ausgewertet und verarbeitet werden können, um einen objektiven und schnellen Nachweis des jeweils aktuellen Bautenstandes zu führen. Die Fragestellung führt ebenfalls zur Untersuchung geeigneter Verfahren zur automatisierten Abbildung und Darstellung des Leistungsstandes.

Das Konzept soll als unternehmensspezifische Lösung entwickelt werden. Dieses soll in der Lage sein, Unternehmen effektiv bei der Baustellenbewertung zu unterstützen, Fehlentwicklungen frühzeitig zu erkennen und dadurch einen Wettbewerbsvorteil zu erlangen.

Eine wesentliche Prämisse ist es, das Konzept in die bestehenden Arbeitsprozesse der Bauausführung zu integrieren, um so u. a. eine höhere Akzeptanz und Praktikabilität sowie einen routinierten Betriebsprozess zu erlangen.

Auf Basis der genannten Zielstellung ergibt sich folgende Forschungsleitfrage.

F1            Wie kann ein Konzept zur automatisierten Leistungsfeststellung zweckmäßig und bedarfsgerecht gestaltet werden?

Anhand der nachstehenden Forschungsleitfragen (F1.1 bis F1.3) wird die Forschungsleitfrage F1 spezifiziert und detailliert.

F1.1        Wie kann das Konzept in die Prozesse des Baustellencontrollings integriert werden?

F1.2        Welche Rahmenbedingungen sind bei der Gestaltung des Konzeptes zu berücksichtigen?

F1.3        Wie muss die Datenverarbeitung für ein integriertes Konzept gestaltet werden?

#### **1.4 Einordnung und Abgrenzung der Arbeit**

Die vorliegende Arbeit nimmt eine inhaltlich-organisatorische Betrachtung im Sinne des Baubetriebswesens vor. Der Fokus liegt auf baubetrieblichen Fragestellungen. Obwohl die Arbeit etliche Informatikaspekte betrifft, bilden diese nicht den Fokus der Arbeit. Bspw. sind programmierseitige Umsetzungen des Gesamtsystems nicht Thema der Arbeit.

Besonders relevant für das Erreichen der Ziele ist die Auseinandersetzung mit angewandten Verfahren im Straßenbau zur Fest- und Darstellung der erbrachten Leistung. Der Prozess der Bauleistungsfeststellung im Sinne des Fertigstellungsgrades (Baufortschritt) ist von Bedeutung, andere Tätigkeiten in der Projektabwicklung werden aber nicht betrachtet. Maßgeblich ist die Perspektive des Baustellenpersonals, welches aus technischer Sicht unmittelbar den Prozess der Bauleistungsfeststellung betreut.

Eine nationale Umfrage zu derzeitigen Prozessen und deren Verbesserungsoptionen von Bauunternehmen des Straßen- und Tiefbaus bildet den Status quo in der deutschen Bauindustrie ab.

Die Aufnahme des Bauzustandes erfolgt per Unmanned Aerial Vehicle (UAV) und Auswertungsverfahren der Photogrammetrie.

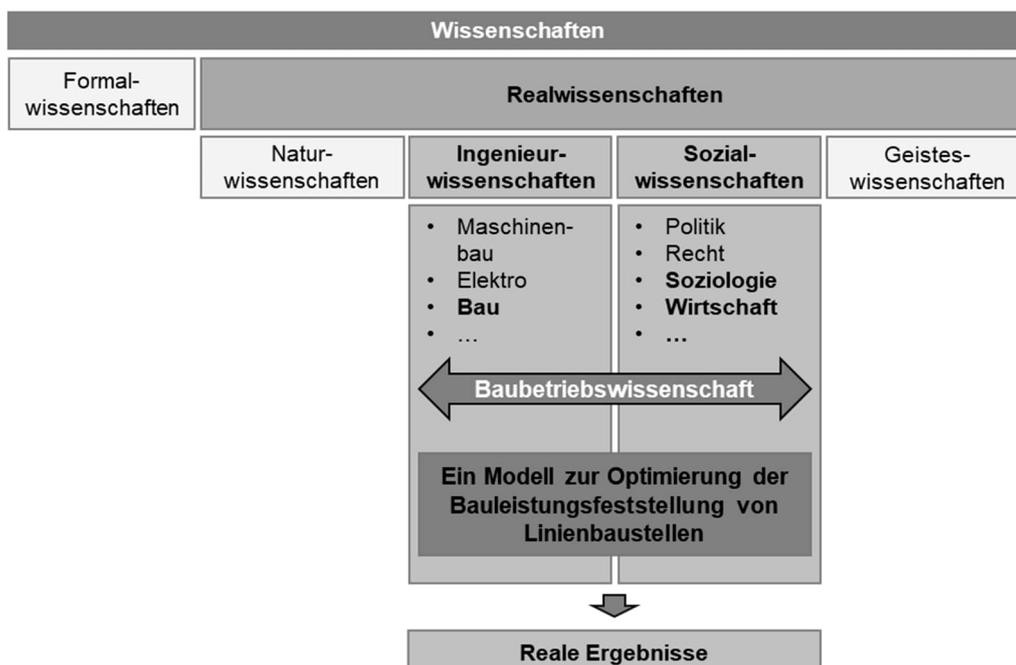
Die Arbeit unterscheidet sich in der Vorgehensweise und Methodik von bereits abgeschlossenen Forschungsarbeiten dahingehend, dass ein Ansatz entwickelt wurde, welcher den Prozess von der Leistungserfassung bis hin zur Auswertung umfasst. Die Anwendung kann bedarfsgerecht in die Strukturen der Zielgruppe übernommen werden und sieht eine durchgängige Datenübergabe vor. Es wird für die Arbeit angenommen, dass Soll-Vorgaben aus dem Bauwerksinformationsmodell die als Grundlage für die vergleichenden Analysen dienen, korrekt und aktuell sind. Mittels dieser Annahmen und Auswertung der Ist-

Daten kann eine Bewertung der Leistung vorgenommen und im Bauwerksinformationsmodell repräsentiert werden.

### 1.5 Forschungsmethodik

Die vorliegende Arbeit baut auf den bisherigen internationalen und nationalen Forschungsergebnissen zum baubetrieblichen Einsatz digitaler Technologien zum Abbild des Baufortschrittes und der notwendigen Ist-Daten für ein erfolgreiches Controlling auf. Hieraus wird ein Ansatz zur objektiven Abbildung des Leistungsstandes einer typischen Linienbaustelle im Infrastrukturbau entwickelt. Dieser wird bis zu einem Prototyp erarbeitet. Die Anwendung des Ansatzes an mehreren Projekten zeigt dessen Qualität und Funktionalität.

Die angewandte explorative Forschungsmethodik ist im baubetrieblichen Kontext den Realwissenschaften zuzuordnen. Nach Girmscheid erstreckt sich die Baubetriebswissenschaft über die Ingenieur- und Sozialwissenschaften. (Vgl. Girmscheid, 2007, S. 47) Die vorliegende Forschungsarbeit greift beide Felder auf und ist in der nachfolgenden Abbildung 1 dargestellt. Sämtliche nachfolgenden Abbildungen, die keine explizite Referenz aufweisen, wurden im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und unterliegen dem Eigentum des Autors.



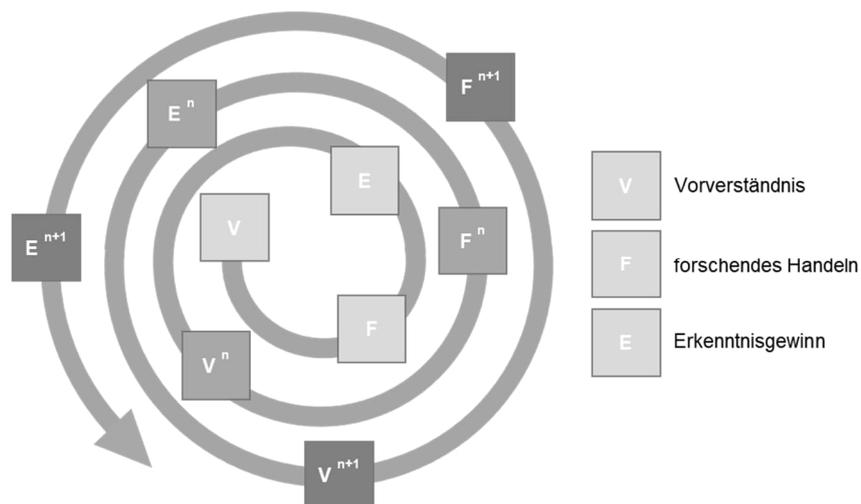
**Abbildung 1: Einordnung der vorliegenden Arbeit in die Baubetriebswissenschaft**  
 Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Girmscheid, 2007, S. 47

Die Arbeit lehnt sich an das von Banse et al. umfassend dargestellte Verständnis der Technikwissenschaften zwischen Theorie und Praxis an. Gesellschaftliche Ziele werden durch eine lösungsorientierte Forschung von sozio-technischen Systemen und durch die Suche nach gegenständlichen Mitteln erreicht. Es werden konkrete Entwicklungsaufgaben ausgehend von Fragestellungen aus der Praxis verfolgt, um potenziell nutzbringende technische Produkte und Prozesse zu antizipieren. Gewonnenes Wissen wird zur Sicherstellung der Wiederholbarkeit systematisiert. (Vgl. Banse et al., 2006, S. 39 ff.)

Die Wissenserweiterung erfolgt in der vorliegenden Arbeit auf dem hermeneutisch orientierten Forschungsparadigma der Baubetriebswissenschaft. Die Prüfung der wissenschaftlichen

Erkenntnisse wird in der vorliegenden Arbeit durch die Einbettung in den theoretischen Bezugsrahmen sowie mit Durchführung von Realisierbarkeitstests zur Prüfung der intendierten Wirkungen erfolgen. (Vgl. Girmscheid, 2007, S. 48 ff.)

Zur Grundlage der Wissenserweiterung wurde ein qualitativer Forschungsansatz gewählt, der sich der Sozialwissenschaften bedient. Es wurde eine fallstudienorientierte Datenerhebung mittels Experteninterviews durchgeführt. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden dem wissenschaftlichen und theoretischen Kontext aus der Literatur gegenübergestellt. Die Erhebung dient einer thematisch strukturierten Realisierung des Forschungsgegenstandes und soll eine prototypische Entwicklung ermöglichen, die sowohl der Praxis als auch der Wissenschaft gleichermaßen dient. Die Umsetzung erfolgt anhand eines iterativen Entwicklungsprozesses. Der Zyklus zur Erreichung eines nötigen Wissensstandes ist ein spiralförmiger Prozess, der ausgehend von einem Vorverständnis durch das forschende Handeln zu einem Erkenntnisgewinn führt, der wiederum die Basis für ein weiterentwickeltes Vorverständnis herstellt, Abbildung 2.



**Abbildung 2: Zyklus zur Erreichung des Wissenstands**

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Boehm, 1988, S. 64; Lorenzen, 1974, S. 19 f.

Das explorative problemlösende Vorgehen hat sich insbesondere in der Wirtschaftsinformatik als Forschungsmethodik etabliert. (Vgl. Heinrich, 2005, S. 107 ff.; Mayr, 2005, S. 88 ff.) Der aktuelle Stand der Technik stellt in der vorliegenden Arbeit das ursprüngliche Vorverständnis dar. Sowohl durch nationale und internationale Recherchen als auch mittels Datenerhebung durch Experteninterviews sowie Datenerhebung durch Tests und die praktische Umsetzung und Anwendung des angestrebten Lösungsprozesses wird das forschende Handeln beschrieben. Daraus wird wiederum Erkenntnis abgeleitet, die fortwährend zu einem weiterentwickelten Vorverständnis und daraus zu vertieftem forschendem Handeln führt. Die resultierende aufbauende Entwicklung eines standardisierten Prozesses und Prototyps liefert für die Analyse der Ziel-Mittelbeziehung direkte Erkenntnisse zur Wissenserweiterung. (Vgl. Binder, 2014, S. 7)

Im Zuge des iterativen Vorgehens bei der Entwicklung, dem Hinzulernen und dem ständigen Erkenntnisgewinn wird gemäß Sachse et al. die Problemlösungsfähigkeit auch innerhalb komplexer Sachverhalte mit ihren vielfältigen Wirkstrukturen sichergestellt. (Vgl. Sachse et al., 1998, S. 4 ff.) Der zielgerichtete operationale Lernprozess der Entwicklung eines Prototyps als

konzeptuelles Konstrukt für das forschungspraktische Handeln erfolgt gleichzeitig aus der Beobachtung und Dokumentation der praktischen Umsetzung wie auch der iterativen Weiterentwicklung des Forschungsansatzes. (Vgl. Binder, 2014, S. 7; Rusch, 2011, S. 184 ff.)

## 1.6 Struktur der Arbeit

Abbildung 3 zeigt die schematische Struktur und den inhaltlichen Aufbau der Arbeit. Nach einer Einleitung in **Kapitel 1** und der Auseinandersetzung mit dem bestehenden Problem, der Erläuterung der Zielstellung sowie der aufgestellten Forschungsleitfrage sowie der angewandten Forschungsmethodik wird die Arbeit durch Abgrenzung und Einordnung weiter spezifiziert.

Darauf erfolgt in **Kapitel 2** die Auseinandersetzung zum Stand der Forschung des Controllings von Baustellen und deren spezifischen digitalen Anwendungen. Der Schwerpunkt liegt auf der Erfassung von Ist-Daten, welche für das Controlling unabdingbar sind; diesbezüglich erfolgen weitere Untersuchungen im Zuge der Arbeit. Die Interoperabilität sowie korrekte Bewertung der Daten stellen sich als entscheidende Faktoren für ein verbessertes Controlling dar.

**Kapitel 3** stellt mit der durchgeführten empirischen Untersuchung den Status quo sowie das Entwicklungspotenzial der Bauleistungsfeststellung in nationalen Tiefbauunternehmen dar. Auf dieser Basis wurden in **Kapitel 4** priorisierte Anforderungen abgeleitet und Kategorien entwickelt, welche den vorrangigen Bedarf für eine optimierte Bauleistungsfeststellung wiedergeben.

Die Einordnung und Priorisierung bestimmt das erforderliche Vorgehen, welches für das Lösungskonzept in **Kapitel 5** von Bedeutung ist. Dies beinhaltet ein abstraktes Modell, das der Optimierung der Bauleistungsfeststellung dient und die priorisierten Anforderungen aus Kapitel 4 berücksichtigt. Es wird ein Systemzusammenhang hergestellt, welcher die erforderlichen zu entwickelnden Prozesse und deren prototypische Umsetzung abbildet.

In **Kapitel 6** wird demonstriert, wie das Modell validiert und in die Praxis übertragen werden kann. Dafür wird die prototypische Entwicklung anhand des entwickelten Prozesses an einem realen Demonstrationsbeispiel simuliert und ausgewertet.

Im Rahmen des **Kapitels 7** erfolgt die Evaluierung der Erfüllung des analysierten Bedarfs aus Kapitel 4 durch das erarbeitete Lösungskonzept in Kapitel 5.

In **Kapitel 8** erfolgt die Zusammenfassung der Ergebnisse. Wie zukünftige Ansätze in der Wissenschaft und im Baubetrieb auf diese Arbeit aufbauen können, wird im Ausblick zum Forschungsbedarf gegeben.

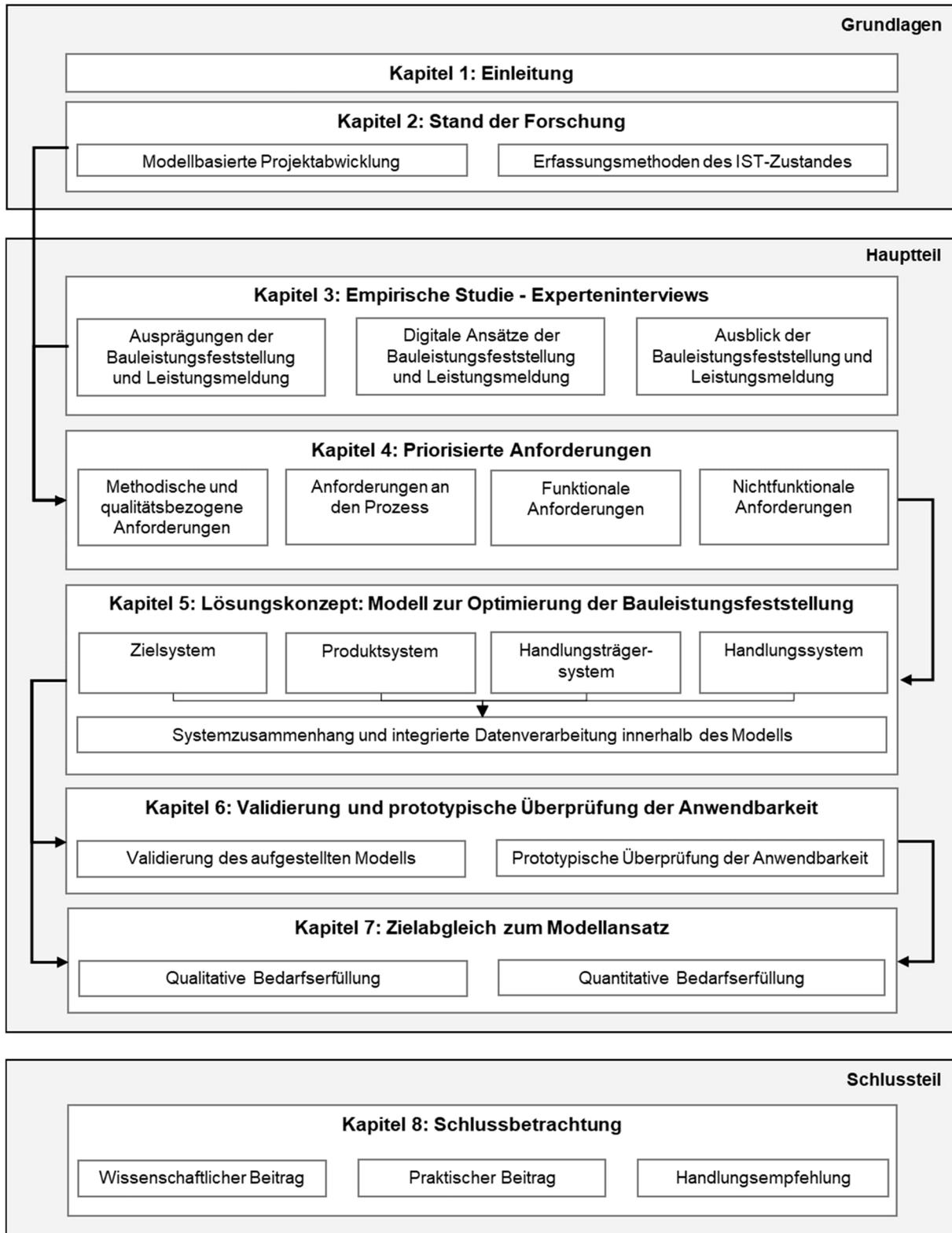


Abbildung 3: Struktur der Arbeit

## 2 Stand der Forschung

### 2.1 Grundlagen und Begriffe

#### 2.1.1 Controlling

In der Literatur existiert eine Vielzahl an Definitionen zum Begriff Controlling, was an nachfolgenden Beispielen gezeigt werden soll.

„[...] Controlling ist – funktional gesehen – dasjenige Subsystem der Führung, das Planung und Kontrolle sowie Informationsversorgung systembildend und systemkoppelnd ergebnisorientiert koordiniert und so die Adaption und Koordination des Gesamtsystems unterstützt. Controlling stellt damit eine Unterstützung der Führung dar: Es ermöglicht ihr, das Gesamtsystem ergebniszielorientiert an Umweltveränderungen anzupassen und die Koordinationsaufgaben hinsichtlich des operativen Systems wahrzunehmen. [...]“ (Horváth et al., 2020, S. 62)

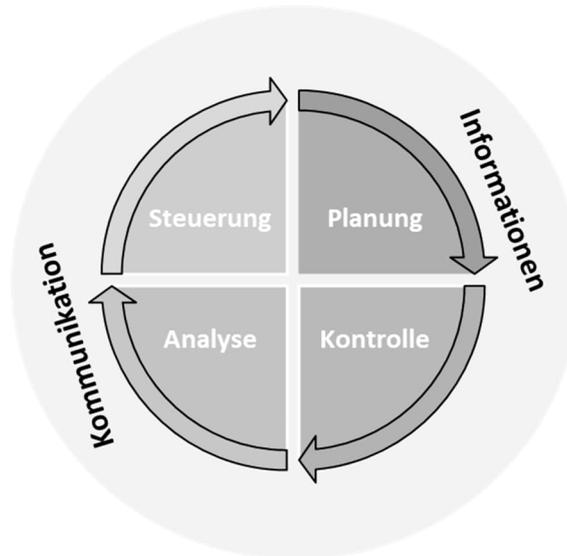
„Unter Controlling ist die Summe aller Maßnahmen zu verstehen, die dazu dienen, die Führungsbereiche Planung, Kontrolle, Organisation, Personalführung und Information so zu koordinieren, dass die Unternehmensziele optimal erreicht werden.“ (Wöhe et al., 2016, S. 176)

„[...] die zielbezogene Unterstützung von Führungsaufgaben, die der systemgestützten Informationsbeschaffung und Informationsverarbeitung zur Planerstellung, Koordination und Kontrolle dient; es ist eine Rechnungswesen- und vortextsystemgestützte Systematik zur Verbesserung der Entscheidungsqualität auf allen Führungsstufen der Unternehmung. [...]“ (Reichmann et al., 2017, S. 19)

Das Management erhofft sich durch das Controlling essenzielle Informationen in Vorbereitung auf Entscheidungen. Unternehmen müssen in der Lage sein sich auf veränderte Gegebenheiten und Situationen zügig einzustellen. (Vgl. Zirkler et al., 2019, S. 24; Preissler, 2014, S. 2)

Generell wird nach Einsatzzweck zwischen strategischem und operativem Controlling unterschieden. Das strategische Controlling fungiert projektübergreifend und stellt die grundsätzlichen (strategischen) Unternehmensziele sicher. Demgegenüber verfolgt das operative Controlling kurz- und mittelfristige Ziele und stellt die Wirtschaftlichkeit einzelner Projekte in den Vordergrund. (Vgl. Fiedler, 2016, S. 63; Leimböck et al., 2015, S. 5; Berner et al., 2013, S. 19)

Im Rahmen der Arbeit wird daraus abgeleitet, dass unter dem Begriff *Controlling* eine Steuerungs- und Koordinationskonzeption zu verstehen ist. Mithilfe des Controllings ist ein Unternehmen in der Lage, alle relevanten Unternehmensprozesse konzentriert und übersichtlich abzubilden. Ziel dabei ist es, Unternehmensvermögen zu sichern und zu mehren. Alle werte- und zahlenmäßigen Informationen werden durch Planungs-, Kontroll-, Analyse- und die entsprechenden Steuerungsaktivitäten kommuniziert. Dies erfolgt im kybernetischen Handlungssystem nach Preissler (Abbildung 4).



**Abbildung 4: Kreislauf der Controllingaktivitäten**

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Preissler, 2014, S. 2

### 2.1.2 Projektcontrolling

Im Kontext der vorliegenden Arbeit steht das Projektcontrolling als Ausprägung des operativen Controllings im Vordergrund. Die DIN 69901 definiert Projektcontrolling folgendermaßen.

„Sicherstellung des Erreichens aller Projektziele durch Ist-Datenerfassung, Soll-Ist-Vergleich, Analyse der Abweichungen, Bewertung der Abweichungen gegebenenfalls mit Korrekturvorschlägen, Maßnahmenplanung, Steuerung der Durchführung von Maßnahmen.“  
(DIN 69901-5, 2009, S. 12)

Das Projektcontrolling ist ein kontinuierliches Handlungssystem, bestehend aus wiederholenden einzelnen Prozessen zur Erhöhung der Handlungsvarietät und wird als kybernetischer Regelkreis dargelegt. (Vgl. Fiedler, 2016, S. 11; Leimböck et al., 2015, S. 5; DIN 69901-5, 2009, S. 12)

Grundlage eines erfolgreichen Projektcontrollings sind definierte Ziele sowie ein festgelegtes Leistungssoll, welche durch Kosten, Termine und Leistungsspezifikationen zu bestimmen sind. (Vgl. Leimböck et al., 2015, S. 7)

Die nachstehenden Grundsätze (Tabelle 1) dienen als Grundlage der vorliegenden Arbeit und sollen in das zu entwickelnde Modell einfließen.

**Tabelle 1: Grundsätze des Projektcontrollings**

	Beschreibung	Bedeutsames Kriterium
1	Controlling bedeutet Planen, Überwachen und Steuern	Keine reine Kontrolle
2	Controlling betrachtet Ergebnisse, Kosten und Termine	Keine reine Kostenbetrachtung
3	Controlling betrachtet Strategien und deren Durchführung	Nicht nur Produkte und Abteilungen

4	Controlling wird als durchgängiges, integriertes System verstanden	Keine reine Methodensammlung und -darstellung
5	Controlling ist die Aufgabe aller Fach- und Projektverantwortlichen	Nicht allein Verantwortung einer Stabsstelle

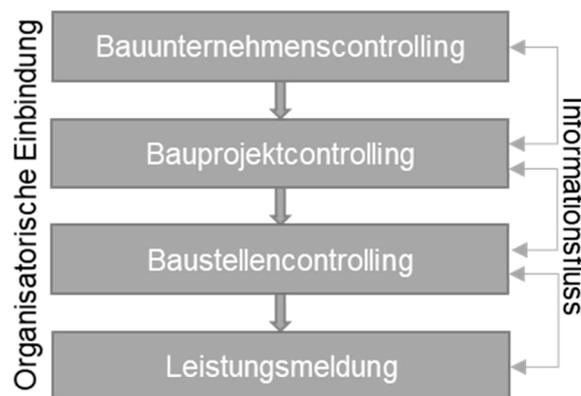
Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Zirkler et al., 2019, S. 26

Jeder Prozess eines Systems ist hinsichtlich seines positiven und negativen Beitrages zur Zielerfüllung zu bewerten. Eine objektive Bewertung der lokalen und globalen Leistungsfähigkeit ermöglichen Kennzahlen. (Vgl. Goldratt und Cox, 2013, S. 86 ff.) Die visuelle Darstellung der Projektinformationen und -kennzahlen trägt entscheidend zu einem effizienten Projektcontrolling bei, insbesondere, wenn diese automatisch generiert werden. (Vgl. Chou et al., 2010, S. 596 ff.)

### 2.1.3 Abgrenzung Bauprojektcontrolling/ Baustellencontrolling

Ein Bauprojekt ist üblicherweise in hierarchische und funktional orientierte Organisationsstrukturen gegliedert. Diese unterteilte Arbeitserbringung führt dazu, dass die eigenen Aufgabenbereiche der Beteiligten im Vordergrund stehen, ohne dass der übergeordnete Gesamtprozess gesehen wird. Eine fehlerbehaftete und unzureichende Kommunikation unter den Beteiligten kommt hinzu. Des Weiteren führt Heyl an, dass der Beitrag einzelner Arbeitsleistungen zum Projekterfolg nicht transparent ist und dadurch nur schwer bewertet werden kann. (Vgl. Heyl, 2019, S. 18) DelPico zeigt, dass unter diesen Voraussetzungen das Projektcontrolling als wesentliche Grundlage für eine erfolgreiche Projektabwicklung gesehen wird. Es stellt sich umso wertvoller für Bauunternehmungen dar, da sich derzeit noch kein durchgängiges und konsistentes Projektcontrolling etabliert hat. (Vgl. DelPico, 2013, S. 7) Die Vielfalt der internen und externen Einflussgrößen in einem Bauprojekt belegt dies. Sie ist auf den Unikatcharakter von Bauprojekten zurückzuführen. (Vgl. Leimböck et al., 2015, S. 6; DelPico, 2013, S. 32 f.)

Zur Einordnung des Baustellencontrollings und einer einheitlichen Verwendung der Begrifflichkeiten dient Abbildung 5 und deren Erläuterungen.



**Abbildung 5: Struktur vom Bauunternehmenscontrolling bis zur Leistungsmeldung**

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Pieper, 2019, S. 9

Bauunternehmenscontrolling hat als primäres Ziel, die Rentabilität und Liquidität des Bauunternehmens zu steuern. (Vgl. Oepen, 2003, S. 193) Das Bauunternehmenscontrolling soll bei gegebenen Abweichungen ursachengerechte Gegensteuerungsmaßnahmen einleiten.

Notwendige Informationen zur Überwachung der Soll-Vorgaben entstammen aus dem Zahlenmaterial des Bauprojektcontrollings. Die Grundlage dieser strategischen und operativen Ebene bildet das Datenmaterial des Finanz- und Rechnungswesens. (Vgl. Oepen, 2003, S. 193 f.) Zwischen dem Bauprojekt- und Baustellencontrolling existiert eine gleichwertige Beziehung. Als operative Ebene setzt sich das Bauprojektcontrolling mit gegenwartsorientierten Zahlen und Ergebnissen auseinander und verfolgt die Umsetzung kurz- und mittelfristiger Unternehmensziele. (Vgl. Leimböck et al., 2015, S. 6)

Dem Bauprojektcontrolling sind die Phasen der Akquisition und Angebotsbearbeitung, der Projektdurchführung bis hin zur Fertigstellung und der darauffolgenden Analyse zugeordnet. Es wird als ein auf das einzelne Bauprojekt fokussierte Steuerungssystem verstanden.

Der Prozess des Baustellencontrollings umfasst den Zeitraum vom Baubeginn bis zum Bauende einer Maßnahme. (Vgl. Oepen und Keidel, 2018, S. 523 ff.) Planung, Steuerung und Kontrolle einer Baumaßnahme als offenes System für alle Projektverantwortlichen wird von Seyfferth als Hauptaufgabe eines Baustellencontrollings angesehen. (Vgl. Seyfferth, 2003, S. 3 f.) Wirth definiert Baustellencontrolling wie folgt: „Das Baustellencontrolling überwacht und steuert die Liquidität und das Ergebnis einer Baumaßnahme.“ (Wirth, 2015, S. 2)

In Form von Soll-Ist-Vergleichen erfolgt die Leistungs- und Kostenkontrolle einer Baumaßnahme mit dem Ziel einer wiederholenden Analyse der Bauausführung, um Erkenntnisse über diese zu erlangen und möglichen Fehlentwicklungen frühzeitig entgegenwirken zu können. (Vgl. Berner et al., 2015, S. 60; Ailland, 2013, S. 2; Seyfferth, 2003, S. 475)

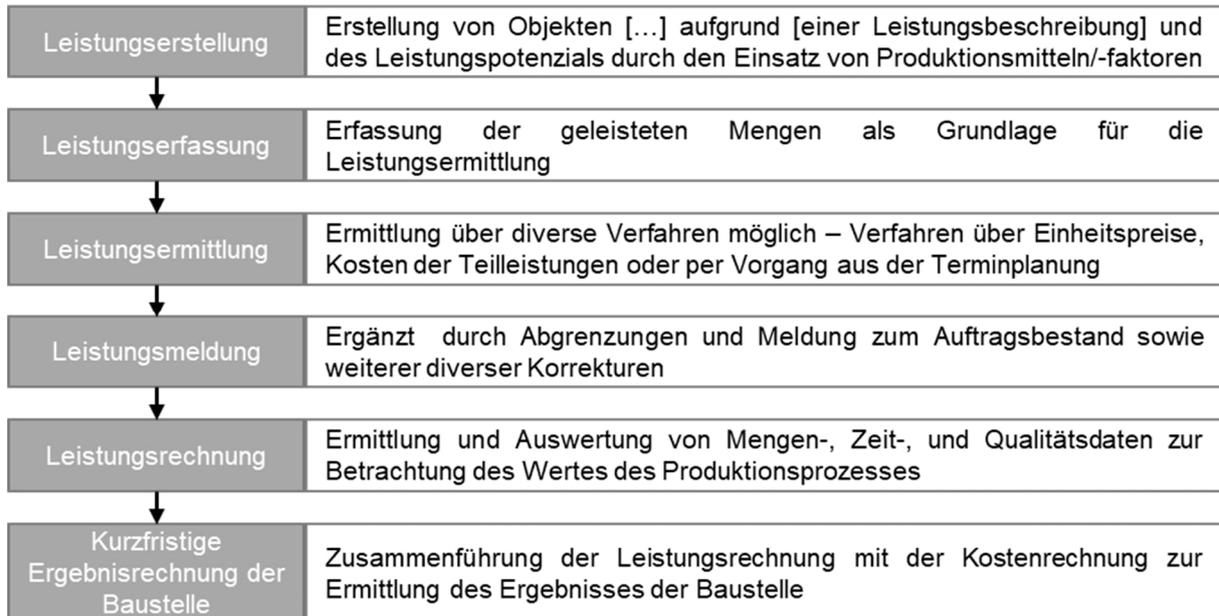
Bezug nehmend auf die vorliegende Arbeit soll dies um den Bereich der Terminplanung und -überwachung ergänzt werden, um einen Vergleich der Leistungsabschnitte zu gewährleisten. Ein reiner Kostenvergleich ohne die Einbindung der zeitlichen Komponente kann keine fundierte Aussage zum tatsächlichen Status einer Baustelle geben. Die vorliegende Arbeit betrachtet den Prozess des Baustellencontrollings. Vor- und nachgelagerte Prozesse werden in der Arbeit nicht untersucht.

#### **2.1.4 Leistungsmeldung im Baustellencontrolling**

Das baubetriebliche Rechnungswesen teilt sich in zwei Bereiche – zum einen das externe Rechnungswesen, welches auch als Unternehmensrechnung bezeichnet wird, und zum anderen das interne Rechnungswesen, welches die Kosten-, Leistungs- und Ergebnisrechnung abbildet. Obwohl beide Bereiche eng miteinander verzahnt sind, unterscheiden sie sich deutlich in ihrem Aufbau, ihrem Detaillierungsgrad und in ihrer Organisationsstruktur. (Vgl. Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V., 2016, S. 11)

Die Leistungsmeldung erfolgt im Rahmen der Kosten- und Leistungsrechnung eines Bauunternehmens, welche eng mit dem Baustellencontrolling verknüpft ist (Vgl. Oepen, 2003, S. 44). Zumeist ist die Leistungsmeldung ein vom Unternehmen vorgegebener Pflichtreport, der zu einem festen Stichtag den Leistungsstand der Baustelle wiedergibt (Vgl. Seyfferth, 2003, S. 455). Diese Aufbereitung der Leistungsdaten bildet die Basis der Leistungsrechnung und stellt eine wichtige Grundlage für alle Planungsrechnungen und Kontrollaufgaben dar. Die Kostenrechnung erfasst alle anfallenden Kosten und stellt diese zur Auswertung nach diversen Kriterien bereit. Die Verbindung von Kosten- und Leistungsrechnung ist von besonderer

Bedeutung zur Steuerung eines Bauprojektes. Die Kosten- und Leistungsrechnung wird oft auch als Ergebnisrechnung im Rahmen des internen Rechnungswesens bezeichnet. Dazu werden die Kosten von der Leistung abgezogen. Dieser Prozess wird meist monatlich verfolgt und zum Monatsultimo der Gewinn oder Verlust einer Baustelle berechnet. Werden die einzelnen Kosten- und Leistungsrechnungen der Kostenstellen addiert, erhält man das Ergebnis einer gesamten Unternehmung. Aufgrund vielfältiger Abstimmungen sowie eines aufwendigen Gesamtprozesses liegt ein Ergebnis in den meisten Bauunternehmen erst zwischen dem 15. und 20. Tag des Folgemonats vor. (Vgl. Berner et al., 2015, S. 209 f.) Die nachfolgende Abbildung 6 verdeutlicht nochmals den Zusammenhang.



**Abbildung 6: Begriffsabgrenzung und Verlauf der Ergebnisrechnung**

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Berner et al., 2015, S. 209 ff.; Girmscheid, 2014, XL; Seyfferth, 2003, S. 455

### 2.1.5 Methoden der Leistungsermittlung

Die Literatur zur Leistungsermittlung gibt diverse Methoden und Vorgehensweisen zur Ermittlung der Leistung wieder. Für ein einheitliches Verständnis sind folgende Definitionen hilfreich (Tabelle 2).

**Tabelle 2: Abgrenzung diverser Mengen bez. der Leistungsermittlung**

Beschreibung	Definition
Ausführungsmengen	... werden auf Grundlage des Arbeitsverzeichnisses für die interne Kalkulation verwendet. ... dienen der Arbeitsvorbereitung und sollten den gegenständlichen Mengen entsprechen.
Rechnungsmengen (RE-Mengen)/ Abrechnungsmengen	... werden auf Basis des Leistungsverzeichnisses unter Verwendung entsprechender Abrechnungsregeln (VOB/C) ermittelt. ... sind für das Vertragsverhältnis zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer relevant.

Leistungsmengen (LE-Mengen)	... sind das Ergebnis des Produktionsvorgangs, welches sich aus mehreren Produktionsfaktoren zusammensetzt. ... benötigen Produktionsfaktoren wie bspw. Lohnstunden, die Menge des benötigten Materials, den Einsatz von Gerätschaften.
--------------------------------	--

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Bargstädt und Steinmetzger, 2016, S. 190 f.; Leimböck et al., 2015, S. 2

Im Allgemeinen muss als Grundlage einer Leistungsermittlung die geleistete Menge erfasst werden. Dies kann durch rechnerisches Aufmaß (Berechnung anhand von Zeichnungen), das Messen vor Ort (bspw. Erdmassen im Straßenbau), über Wiegen (bspw. Schüttgutlieferungen oder durch Schätzen des Fertigstellungsgrads erfolgen. (Vgl. Berner et al., 2015, S. 211)

Die Leistungsermittlung erfolgt über die Multiplikation meldefähiger (und messbarer) Positionen mit dem Verrechnungssatz. Daraus ergibt sich die Leistung einzelner Positionen, die kumuliert die Gesamtleistung der Baustelle ergibt. Unter meldefähigen Positionen sind Positionen des Leistungsverzeichnisses beim Einheitspreisvertrag<sup>1</sup>, ein intern erstelltes Leistungsverzeichnis auf Basis einer funktionalen Ausschreibung<sup>2</sup> sowie Vorgänge des Terminplans zu verstehen. (Vgl. Berner et al., 2015, S. 212 ff.)

#### Einheitspositionen als Grundlage der Leistungsermittlung

Die KLR Bau bezeichnet die Leistungsermittlung über Einheitspreise eines Leistungsverzeichnisses als die klassische Methode. Das Verfahren entspricht einer Rechnungsstellung, indem die geleisteten Mengen mit den vertraglich vereinbarten Einheitspreisen multipliziert werden. Hierbei dürfen gewährte Skonti oder Nachlässe nicht vergessen werden. (Vgl. Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V., 2016, S. 107; Berner et al., 2015, S. 212)

Aus der Rechnungsmenge multipliziert mit den Einheitspreisen (EP) ergibt sich der Rechnungsbetrag je Position.

$$RE\text{-Menge} * EP = \text{Rechnungsbetrag}$$

Die einzelnen Positionen kumuliert betrachtet ergeben den Gesamtrechnungsbetrag. In der Regel versucht ein Bauleiter die Leistungsmeldung und Abschlagsrechnung auf denselben Stichtag zu legen, da die Leistungsmeldungen ohnehin meist zu Monatsende erfolgen müssen und monatliche Abschlagsrechnungen einen zeitigen Mittelzufluss gewährleisten.

Die monatliche Baustellenleistung ist dann methodisch mit der Ermittlung des monatlich anzufordernden Abschlagsbetrages eins und ergibt sich aus der kumulierten Gesamtrechnung abzüglich der bisher ausgestellten Rechnungen.

<sup>1</sup> Bauleistungen sind so zu vergeben, dass die Vergütung nach Leistung bemessen wird. In der Regel geschieht das zu Einheitspreisen für technisch und wirtschaftlich einheitliche Teilleistungen, deren Menge nach Maß, Gewicht oder Stückzahl vom Auftraggeber in den Vertragsunterlagen anzugeben ist. (VOB, 2019, S. 4)

<sup>2</sup> Bauleistungen sind so zu vergeben, dass die Vergütung nach Leistung bemessen wird, und zwar: in geeigneten Fällen für eine Pauschalsumme, wenn die Leistung nach Ausführungsart und Umfang genau bestimmt ist und mit einer Änderung bei Ausführungen nicht zu rechnen ist (Pauschalvertrag). (VOB, 2019, S. 4)

Eine positionsbezogene Leistung wird wie folgt ermittelt.

$$LE\text{-Menge} * EP = \text{positionsbezogene Leistung}$$

Die Summe aller einzelnen Positionsbeträge ergibt die Gesamtleistung der Baustelle.

$$\Sigma \text{ positionsbezogener Leistungen} = \text{Baustellengesamtleistung}$$

Nur in wenigen Positionen sind in der Praxis RE-Mengen und LE-Mengen nicht identisch. Die Ausnahmen sind bspw. Nachträge oder Leistungen, die erst während des Rechnungslaufes erbracht werden, aber aufgrund einer bereits erbrachten hohen Teilleistung in der Abschlagsrechnung aufgenommen wurden. (Vgl. Berner et al., 2015, S. 212) Fehlende Einheitspreise für Teilleistungen können bei dieser Leistungsermittlung problematisch werden, wenn nur die gesamte Position im Leistungsverzeichnis preislich bestimmt ist.

Des Weiteren werden häufig die Gemeinkosten der Baustelle fälschlicherweise leistungsabhängig bewertet, was dazu führt, dass Abweichungen zwischen der tatsächlichen Leistungserstellung und -ermittlung aufkommen. Dies wiederum erzeugt in der Folge eine Ergebnisverzerrung und somit ein falsches Bild zum tatsächlichen Stand des Bauprojektes. Darüber hinaus stellt Oepen ebenso den Einheitspreis als Bewertungsmaßstab infrage, da dieser durch preispolitische und spekulative Einflussfaktoren gelenkt ist. (Vgl. Oepen, 2003, S. 123 ff.)

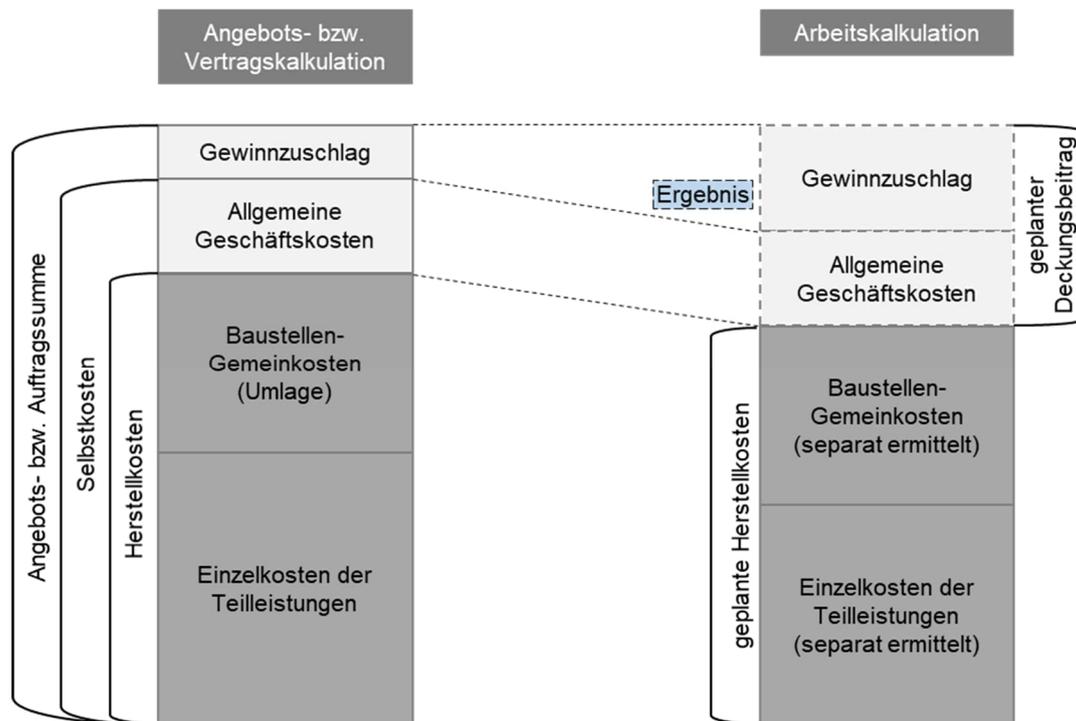
#### Teilleistungen als Grundlage der Leistungsermittlung

Als alternative Methode zeigt die KLR Bau die Bewertung der geleisteten Mengen zum Stichtag auf Basis der Soll-Herstellkosten und der Soll-Spanne der Arbeitskalkulation unter Hinzurechnung des projektspezifischen Deckungsbeitrages vor (Vgl. Berner et al., 2015, S. 213). Die Soll-Spanne der Arbeitskalkulation gibt den mittleren Deckungsbeitrag wieder. Dieser ergibt sich aus der Auftragssumme der Vertragskalkulation abzüglich der Soll-Herstellkosten der Arbeitskalkulation. (Vgl. Leimböck et al., 2015, S. 150) Dieses Vorgehen ist von der Rechnungsstellung gegenüber dem Auftraggeber entkoppelt.

$$\begin{aligned} & LE\text{-Menge pro LV-Position} * \text{Einzelkosten der LV-Position (bzw. Unterposition)} \\ + & \frac{LE\text{-Menge pro BGK-Position} * \text{Einzelkosten der BGK-Position}}{=} \\ & \text{Soll-Herstellkosten zum Stichtag} \\ + & \frac{\text{Deckungsbeitrag}}{=} \\ & \text{Baustellengesamtleistung zum Stichtag} \end{aligned}$$

(Vgl. Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V., 2016, S. 106 f.; Oepen, 2003, S. 127)

Der Deckungsbeitrag bildet sich aus den Allgemeinen Geschäftskosten (AGK) und dem zu erwirtschaftenden Gewinn (G), Abbildung 7.



**Abbildung 7: Deckungsbeitrag bei modifizierter Leistungsbewertung**

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V., 2016, S. 36; Oepen, 2003, S. 50

Durch die modifizierte Methode kann eine gleichmäßige Ergebnisbeurteilung der Baustelle erfolgen. Diese orientiert sich an der Kostenverursachung und Kostenentstehung. Voraussetzung ist das Vorhandensein einer Arbeitskalkulation und deren kontinuierliche Aktualisierung. Aufgrund nachträglicher Änderungen der Einzelkosten der Teilleistungen (EKT) können sich aus der Arbeitskalkulation hervorgehende größere Änderungen in der Soll-Spanne ergeben. Insofern diese nicht erkannt werden, können sie zu erheblichen Kalkulationsfehlern in der Leistungsermittlung führen. Darauf beruht das Erfordernis einer stetigen Aktualisierung der Arbeitskalkulation. (Vgl. Berner et al., 2015, S. 213) Auf Grund der fortwährenden Kalkulationsanpassung entfällt eine preisorientierte Leistungsdefinition und folglich wird ein verstärktes Kostenbewusstsein erreicht. Darüber hinaus bietet die Handhabung der Baustellengemeinkosten als EKT einen großen Vorteil - insofern, dass die exakte Ermittlung an den Zeitpunkt ihrer Entstehung angelehnt ist. Kosten und Leistungen bauen auf dem gleichen Mengengerüst auf, wodurch die Aussagefähigkeit des Ergebnisses genauer ist. Dies rechtfertigt eine Präferenz für die modifizierte Methode. (Vgl. Oepen, 2003, S. 126 ff.)

#### Terminplanung als Grundlage der Leistungsermittlung

Eine vorhandene Terminplanung als meldefähige Position kann ebenfalls zur Leistungsermittlung herangezogen werden. Im Rahmen eines regelmäßigen Termincontrollings wird jener prozentuale Fertigstellungsgrad der Vorgänge festgestellt, über den die Leistung der einzelnen Vorgänge ermittelt werden kann. Aufgrund eingesetzter Terminplanungssoftware kann (eine Ressourcenplanung integriert) jedem Vorgang eine Teilvergütung zugewiesen werden. Durch Eingabe des stichtagsbezogenen Datums wird die Gesamt-Baustellenleistung festgelegt. Die Festlegung des Fertigstellungsgrades wird als problematisch angesehen. Dieser erfolgt meist als prozentuale Bewertung auf Basis von

Schätzungen – ohne konkrete Ermittlung der tatsächlichen verbauten Mengen oder des Aufwands. Somit liefert dieses Verfahren nur einen ungefähren Überblick, dass nicht Genauigkeitsansprüchen eines guten Bauprojekt-Controllings entspricht. (Vgl. Berner et al., 2015, S. 214; Oepen, 2003, S. 124)

#### Verknüpfung von Leistungsermittlung und Leistungsmeldung

Die rechnerische Leistungsermittlung über meldefähige Positionen allein kann keine fundierte Aussage über die Baustellenleistung geben. Weitere Angaben wie bspw.:

- Materiallieferungen
- Nachunternehmerleistungen
- Minderungen aufgrund von Preisnachlässen
- zu erwartende Rechnungsabstriche
- Übernahme von Leistungen durch den Auftraggeber
- Rückstellungen für zu erwartende Gewährleistungsarbeiten
- Veränderungen der Leistungen aus Gleitklauseln für Lohn oder Material
- Termin des zu erwartenden Bauendes (Vgl. Berner et al., 2015, S. 216 f.)
- Rechnungsvorgriffe
- Lagerndes Material als Posten zur Rechnungsabgrenzung
- Vergleich der Leistungsmeldung zum Vormonat für die Entwicklungsanalyse (Vgl. Martinsen, 2017, S. 194 f.)

Ebenso sind Informationen zum Auftragsbestand, welcher sich aus der Beauftragung von Nachträgen nicht erfasster, geänderter (§ 2 Abs. 5 VOB/B) bzw. zusätzlicher Leistungen (§ 2 Abs. 6 VOB/B) ergeben, notwendig. (Vgl. VOB, 2019, S. 140; Berner et al., 2015, S. 217) Hierbei wird die Unterscheidung zwischen genehmigten und nicht genehmigten Nachträgen eingefordert. Wichtig ist, dass die nicht genehmigten Nachträge, insofern diese vom Auftraggeber anerkannt und bestätigt sind, in der Leistungsrechnung auf Basis der Soll-Kosten erfasst werden. So wird vermieden, dass sich ein falsches Bild der Ergebnisrechnung ergibt. Gestellte Nachträge sind in die Arbeitskalkulation aufzunehmen und wie eine vertragliche Leistung zu behandeln. Nicht genehmigte Nachträge sollten vorsichtshalber nicht berücksichtigt werden. Sofern die Nachträge anerkannt sind, werden die Leistungen aktiviert. Der Nachweis des veränderten Leistungsumfangs muss kalkulatorisch erfolgen und als Zusatz zur ursprünglichen Leistung angesetzt werden. Andernfalls sollte die veränderte Leistung neu kalkuliert und von den Soll-Kosten abgezogen werden. (Vgl. Martinsen, 2017, S. 193 ff.)

Die Leistungsmeldung an sich ist ein sehr aufwendiger Prozess, der sich aus mehreren Teilschritten zusammensetzt. In der Regel sind Poliere und Bauleiter auf der Baustelle für die Leistungserfassung verantwortlich. Leistungsermittlung und Leistungsmeldung obliegen der Bauleitung und übergeordneten Führung (bspw. Oberbauleitung, technische Leitung). Die Fachliteratur weist kein allgemeingültiges Prozessmodell für die Leistungsmeldung aus, welches beispielsweise einen einheitlichen Ablauf der Bauleistungsfeststellung und Leistungsmeldung visualisiert. Doch mit der Leistungsmeldung wird die Basis für weiterführende unternehmensspezifische Auswertungen geschaffen. (Vgl. Berner et al., 2015, S. 211 ff.)

### 2.1.6 Soll-Ist-Vergleiche im Baustellencontrolling

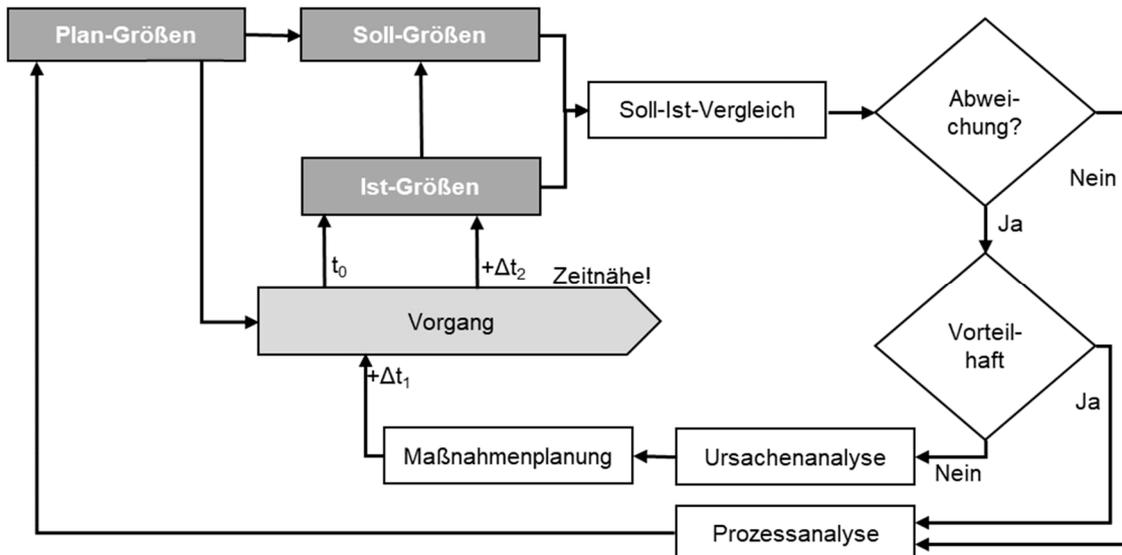
Ob eine Maßnahme innerhalb des Zielkorridors liegt, kann nur durch einen Vergleich zwischen geplanten und realisierten Größen festgestellt werden mit dem Ziel, Abweichungen zu erkennen, um daraus ggf. Maßnahmen zur Steuerung abzuleiten. (Vgl. Motzko, 2013, S. 16) Soll-Ist-Vergleiche sind nur eine vergangenheitsorientierte Betrachtung. Die Beseitigung von Ursachen, die zu Abweichungen vom Soll geführt haben, sind nicht Bestandteil der Kontrolle – und Kontrolle hat noch keinen Einfluss auf künftige Ist-Situationen. (Vgl. Berner et al., 2015, S. 58)

Die integrale Auswertung der Soll-Ist-Vergleiche ist hierbei von besonderer Bedeutung. (Vgl. Girmscheid und Motzko, 2013, S. 129 ff.) Für die Durchführung der Soll-Ist-Vergleiche werden i.d.R. im Vorfeld periodische Zeitabstände festgelegt.

Soll-Ist-Vergleiche bilden die Grundlage der Bauprozesssteuerung und werden nach Motzko und Pflug durch die Basiselemente Plan-Größen, Soll-Größen, Ist-Größen und Prognose-Größen bestimmt. Ausgangsbasis sind die Plan-Größen; sie werden auf der Grundlage des Vertrages mit dem Auftraggeber sowie der internen Produktionsplanungen ermittelt. Sie sind nur dann zu ändern, wenn gültige Vertragsänderungen vorliegen. Soll-Größen werden darauf aufbauend mit der auf der Baustelle geplanten oder in Teilen schon tatsächlich erbrachten Leistung ermittelt. Es ergeben sich bspw. Soll-Stunden aus der Multiplikation eines Aufwandswertes (Plan-Größe) mit der tatsächlich auszuführenden Menge. Ist-Größen stellen den tatsächlich erbrachten Aufwand dar und entstammen im Wesentlichen dem Berichtswesen der Baustelle und der Buchhaltung. Auf Grund des Vergleichs der voran genannten Größe<sup>3</sup> ergibt sich die Ursachenanalyse, die wiederum dazu führt, dass Verbesserungsmaßnahmen zur Bauprozessoptimierung eingeleitet werden können. Wiederum daraus erfolgt die entsprechende Prognose über die künftige Entwicklung der betrachteten Größen. Hervorzuheben ist die Verknüpfung zwischen Zahlenwerten und deren Zeitbezügen. (Vgl. Fiedler, 2016, S. 134; Motzko, 2013, S. 16 f.; Pflug, 2008, S. 19 f.) Den Steuerungsprozess zeigt Abbildung 8.

---

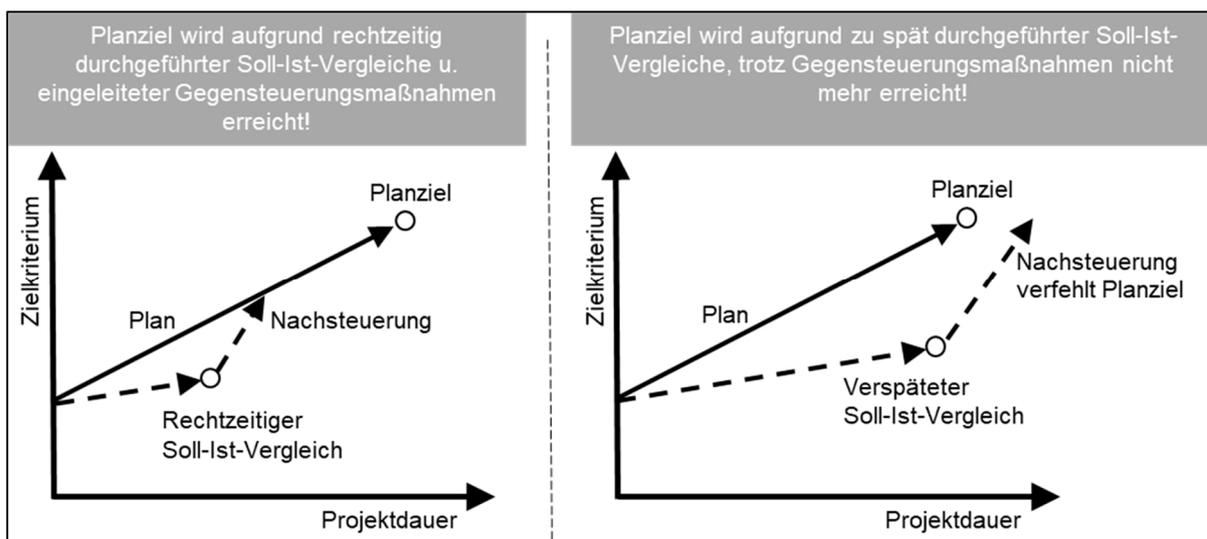
<sup>3</sup> Konkrete Berechnung siehe Martinsen, 2017, S. 248 ff.



**Abbildung 8: Bauprozesssteuerung auf Basis des Soll-Ist-Vergleiches**  
 Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Pflug, 2008, S. 20

Der Verantwortungsbereich hinsichtlich der Erstellung und Auswertung von Soll-Ist-Vergleichen in Bauunternehmen obliegt sowohl der Bauleitung als auch der technischen Leitung. Des Weiteren fällt diese Verantwortung auf das Führungsteam eines Bauprojektes (Projekt-, Niederlassungsleiter bis hin zur Geschäftsführung), das aufgrund des Verschmelzens von Management- und Controllingaufgaben verantwortlich ist. (Vgl. Oepen, 2003, S. 196)

Ob das Projektziel, also die Erfüllung der stichtagsbezogenen Leistungsfertigstellung zu einem geplanten Aufwand, erfüllt ist, ergibt sich schlussendlich aus der geschilderten Abweichungsanalyse. (Vgl. Seyfferth, 2003, S. 461) Bereits Seyfferth erläutert, dass eine zeitnahe Information der Soll-Ist-Vergleiche ausschlagend für die erfolgreiche Realisierung eines Bauprojektes ist. Nur so kann die Information rechtzeitig verarbeitet und können ggf. Maßnahmen zur Gegensteuerung ergriffen werden. (Vgl. Seyfferth, 2003, S. 461) Die nachstehende Abbildung 9 verdeutlicht dies.



**Abbildung 9: Folgen von rechtzeitigen und verspäteten Controllingmaßnahmen**  
 Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Berner et al., 2015, S. 60

Für die Soll-Ist-Vergleiche sind Soll-Zielgrößen zu definieren und deren Bezugsbereiche und -einheiten festzulegen. Diese können sich sowohl auf das Bauprojekt insgesamt, aber auch auf einen Bauabschnitt, einen einzelnen Arbeitsvorgang oder einen Kostenträger<sup>4</sup> beziehen. (Vgl. Seyfferth, 2003, S. 461 ff.)

### Soll-Ist-Vergleich der Kosten

Nach Seyfferth müssen drei Voraussetzungen für einen effektiven Soll-Ist-Vergleich der Kosten gegeben sein.

1. Die Leistungsmengen der Teilleistungen müssen zum Stichtag erfasst sein, um diese auf Basis der Soll-Kosten auszuwerten.
2. Die Ist-Kosten müssen zum Stichtag vorliegen.
3. Technische und kaufmännische Kostenarten müssen inhaltlich aufeinander abgestimmt sein. Das betrifft auch ihre hinterlegte Zuordnung. (Vgl. Seyfferth, 2003, S. 477)

Der rückblickende Soll-Ist-Vergleich stellt eine vergleichende Auswertung der Soll- und Ist-Kosten der zurückliegenden Bauzeit dar. In der Regel werden parallel zwei Zeiträume ausgewertet – der Zeitraum seit Baubeginn bis zum aktuellen Stichtag sowie die letzte Periode, sprich der Zeitraum zwischen vorherigem und aktuellem Stichtag (Berichtsmonat). Die Soll- und Ist-Kosten basieren auf dem tatsächlichen Bauablauf. Nicht nur die Ist-Kosten stehen für den Zeitraum, in denen die Bauleistungen effektiv erbracht wurden, sondern auch die Soll-Kosten.

Die Auswertung der LE-Mengen in den Zeiträumen, in denen die Teilleistungen effektiv geleistet wurden, entsprechen dem Ergebnis der Soll-Kosten und bilden damit den jeweiligen Ist-Bauzustand ab. Stimmen Ist-Termine und Soll-Termine überein, dann entsprechen die Soll-Werte der ursprünglichen Planung. Auffällige Abweichungen hinsichtlich der Richtigkeit der Ist-Werte und der Leistungsmengen sollten vor der Analyse des Soll-Ist-Vergleichs sorgfältig überprüft werden. Eine korrekte Erfassung ist von großer Bedeutung für die Auswertung. (Vgl. Seyfferth, 2003, S. 477) Ein Soll-Ist-Vergleich der Kosten kann auch der Ergebnisvorschau dienen. Aus den Ist-Kosten zum Stichtag, den bewerteten Soll-Kosten für Restbauleistungen (Auswertung der Arbeitskalkulation für die Restmenge der Teilleistungen) und Vorgabeabweichungen ergeben sich die voraussichtlichen Kosten.

$$\begin{array}{r}
 \text{Ist-Kosten (bis zum Stichtag)} \\
 + \quad \text{Soll-Kosten (für Restbauleistungen)} \\
 + \quad \underline{\text{Vorgabeabweichungen}} \\
 = \quad \text{voraussichtliche Kosten}
 \end{array}$$

---

<sup>4</sup> „Ein Kostenträger bezeichnet den Verursacher der Kosten und beantwortet die Frage, wofür die Kosten entstanden sind. Als Kostenträger werden also die im Unternehmen erstellten Produkte und erbrachten Dienstleistungen bezeichnet. Traditionell werden im Bauunternehmen die Positionen des Leistungsverzeichnisses als Kostenträger i.S.d. Kostenträgerrechnung behandelt. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht müssten aber die Bauprojekte als Kostenträger behandelt werden.“ (Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V., 2016, S. 14).

Die Soll-Kosten der Restbauleistung ergeben sich aus der Auswertung der Arbeitskalkulation für die Restmengen der Teilleistungen. Ihre Summe ergibt die zu erbringende Restbauleistung.

$$\begin{aligned} VA\text{-Menge} - LE\text{-Menge} &= \text{Restmenge} \\ \sum \text{Restmengen} &= \text{Restbauleistung} \end{aligned}$$

In der Arbeitskalkulation hinterlegte Ansätze für Abweichungen von den Soll-Kosten entsprechen den Vorgabeabweichungen. Diese werden als zutreffend für die restlichen Bauleistungen angenommen und ebenso für die Restmengen ausgewertet.

Der rückblickende Soll-Ist-Vergleich der Kosten inklusive einer Ergebnisvorschau bis zum Bauende unter Einbeziehung der Ist-Kosten stellt das aussagekräftigste Ergebnis dar. Aus der Bauleistung zum definierten Stichtag addiert mit der Soll-Bauleistung ab Stichtag ergibt sich die Gesamtbauleistung. Hinsichtlich dieser Werte ergibt sich eine aktualisierte Prognose des zu erwartenden Ergebnisses bei Bauende. (Vgl. Seyfferth, 2003, S. 485 ff.)

### Soll-Ist-Vergleich der Termine

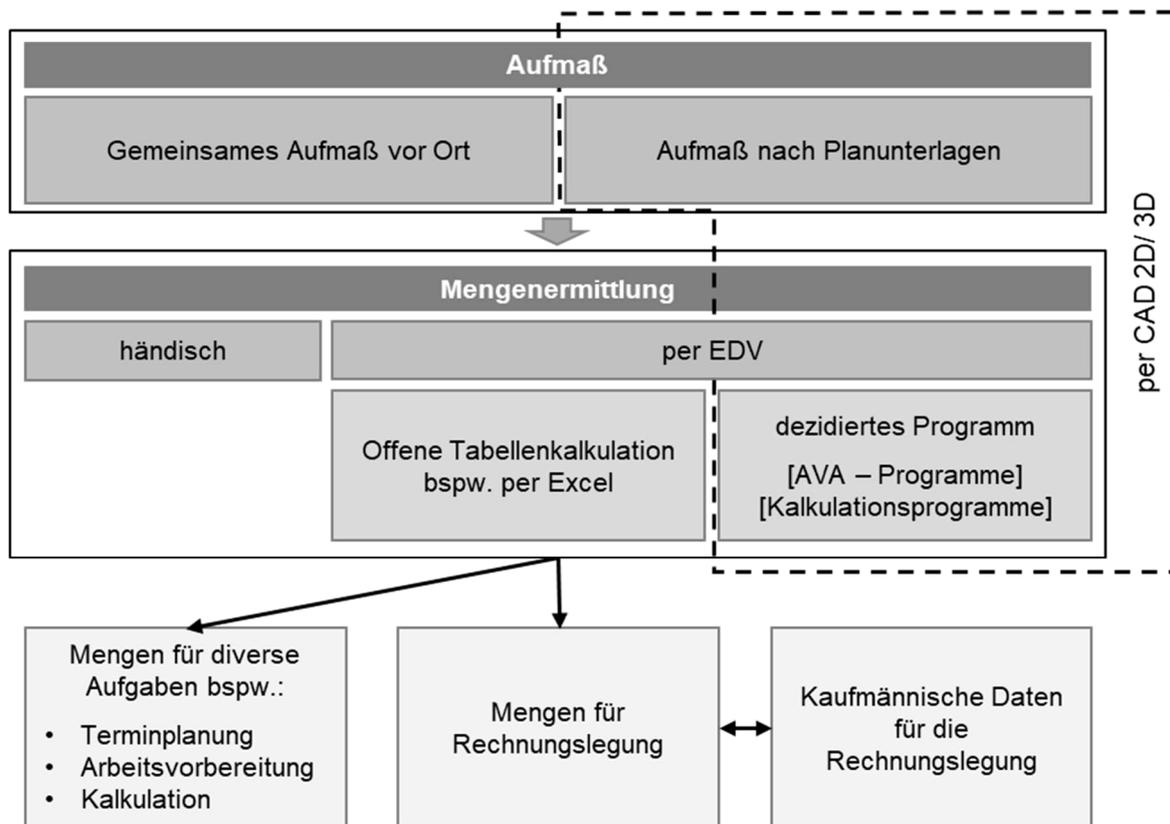
Ein Soll-Ist-Vergleich der Termine besteht aus der häufig praktizierten Methode, im Terminplan unmittelbar die Ist-Termine wiederzugeben. Meist erfolgt dies in Balkenplänen oder Zeit-Weg-Diagrammen. Die Ist-Werte für zeitliche Verschiebungen, die sich aufgrund von Abhängigkeiten negativ auf andere Vorgänge auswirken, werden aufgezeigt. In der Regel ist die Bauablaufplanung sehr knapp bemessen, aber auch Potenziale durch verkürzte Prozesse können dargestellt werden. Um den Anforderungen des Baustellencontrollings gerecht zu werden sollten Vergleiche laufend erfolgen (und nicht nur eine Stichtagsbetrachtung am Monatsende). Durch die regelmäßige Kontrolle können Änderungen gegenüber der bisherigen Disposition frühzeitig aufgezeigt und die Wirtschaftlichkeit eines Projektes gewährleistet werden. (Vgl. Seyfferth, 2003, S. 474 ff.)

### **2.1.7 Methoden der Leistungserfassung**

Die Planung von Infrastrukturmaßnahmen erfolgt weitgehend immer noch anhand von 2D-gestützten Verfahren. Komplexität der Planung, konservative Herangehensweise der Planungsbeteiligten sowie die vorherrschenden aktuellen Richtlinien sind Gründe der sehr langsamen Etablierung einer 3D-basierten Planung im Infrastrukturbau. Die Planung einer Infrastrukturbaumaßnahme besteht aus mehreren Planungsleistungen, welche stark miteinander vernetzt sind. (Vgl. Obergrießer, 2017, S. 6 ff.) Zweidimensionale Planungsmethodik, fehlende Definitionen einer geeigneten, digitalen Vernetzung der Planungsleistungen und mangelnde Vernetzung der Planungsbeteiligten sind Gründe für den Rückstand. Dies führt häufig zu Informationsverlusten. (Vgl. Obergrießer, 2017, S. 5) Aufgrund der fehlenden Vernetzung von Baumaßnahmen stellt sich ein erhöhter Aufwand bei der Erfassung von Leistungen auf der Baustelle ein.

Die Erfassung der Leistung auf der Baustelle erfolgt standardmäßig mittels Messen und per rechnerischem Aufmaß (anhand von Zeichnungen) oder durch die Festlegung eines Fertigstellungsgrades durch Schätzen. (Vgl. Berner et al., 2015, S. 211) Ebenso werden Lieferscheine herangezogen. Wiegen vor Ort, wie es in mancher Literatur beschrieben ist, findet kaum noch Anwendung. Entscheidend für die Erfassung der Leistung ist eine dazu ausreichende Genauigkeit, wie sie in detaillierten Abrechnungsrichtlinien festgelegt ist. (Vgl. Seyfferth, 2003, S. 474)

Aufmaße bilden die Grundlage der Mengenermittlung für die Rechnungsstellung (Abbildung 10). Generell ist zwischen den Verfahren „Gemeinsames Aufmaß vor Ort“ und „Aufmaß nach Planunterlagen“ zu unterscheiden. (Vgl. Berner et al., 2015, S. 167 f.)



**Abbildung 10: Aufmaß als Grundlage der Mengenermittlung**  
Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Berner et al., 2015, S. 167

Die VOB/C DIN18299 Nr. 5 legt fest, dass die Leistung aus Zeichnungen zu ermitteln ist, soweit die ausgeführte Leistung diesen Zeichnungen entspricht. Sind solche Zeichnungen nicht vorhanden, ist die Leistung aufzumessen. (Vgl. VOB, 2019, S. 168) Das Aufmaß nach Plan stellt somit das Regelverfahren dar. Die erbrachte Leistung wird aus den freigegebenen Plänen bzw. Zeichnungen ermittelt. Die Aufmaßdokumente werden hierfür eindeutig gekennzeichnet. Ausführungsänderungen sind zwingend zu ergänzen und im Dokument bspw. dem Aufmaßplan nachzutragen.

Beim gemeinsamen Aufmaß hingegen werden skizzenhaft alle Leistungen erfasst. Es findet oft Anwendung im Erd-, Straßen- und Tiefbau. Aufgrund von Zugänglichkeit bzw. Überbauen von Bauteilen bzw. Tragschichten ist eine nachträgliche Erfassung der Mengen in der Regel nicht mehr oder nur mit hohem Aufwand möglich.

Um die Prüfbarkeit für die Auftraggeberseite zu vereinfachen, wurde eine Sammlung von Regelungen für die elektronische Bauabrechnung (REB) entwickelt. Die Verfahrensbeschreibungen zu den REB mit den Berechnungsmethoden und Methoden zum Austausch von Daten liefern die Grundlage für die Mengenermittlung. (Vgl. Bargstädt und Steinmetzger, 2016, S. 57) Die REB-Verfahrensbeschreibungen enthalten Lösungswege für die verschiedenen Aufgaben bei der Bauabrechnung und die für die Datenverarbeitung jeweils einzuhaltenden organisatorischen und mathematischen Bedingungen. (Vgl. REB Allgemein, 2012, S. 3) Die Mengenermittlung stellt die rechnerische Auswertung der Aufmaße dar. Ziel

ist es, für jede Position des Leistungsverzeichnisses eine Abrechnungsmenge zu ermitteln, welche für den Auftraggeber prüfbar sein muss. (Vgl. Berner et al., 2015, S. 169 f.) Die REB 23.003, stellt in diesem Kontext die allgemeine Mengenermittlung und das nachgeschaltete Abrechnungsverfahren dar. Es soll die Mengenermittlung für alle Positionen einer Baumaßnahme ermöglichen und umfasst alle Hilfs- und Nebenrechnungen. Alle Mengenermittlungen können zu Positions- und beliebigen Zwischensummen zusammengefasst werden. Ebenfalls können textliche Erläuterungen in die Berechnung eingefügt werden. Dies ermöglicht eine rasche und sichere Prüfung der Mengenermittlung von Baumaßnahmen und deren Dokumentation. (Vgl. REB 23.003, 2009, S. 4)

Das Berichtswesen einer Baustelle kann ebenfalls als Informationsquelle zur Leistungsermittlung herangezogen werden. Der Bautagesbericht und das Baustellentagebuch stellen ein gängiges Mittel dar, welches jedoch nicht standardisiert ist. Eine Weitergabe der Daten erfolgt meist nicht tagesaktuell. (Vgl. Ailland, 2013, S. 71 f.) Geleistete Arbeitsstunden werden i. d. R. täglich durch den Polier über den Lohnbericht festgehalten. Über den Arbeitsbericht werden die Kosten der Angestellten ermittelt. Diverse Erfassungsformulare können Aussagen über Materialmengen sowie Geräte und deren Kosten liefern. (Vgl. Seyfferth, 2003, S. 470 ff.) Ailland (2013) führt eine Befragung zu dem angewandten firmeninternen Berichtswesen bauausführender Unternehmen durch. Dieser Untersuchung ist zu entnehmen, dass unter den diversen Dokumentationsmöglichkeiten einer Baustelle das Bautagebuch das gebräuchlichste Mittel zur Dokumentation des Bauablaufes ist.

Neben den Inhalten des Bautagebuches können Prüfprotokolle und Lieferscheine als zuverlässige Aussage zur Bestimmung des Bau-Ist-Zustandes herangezogen werden. Die Auswertung dieser Untersuchung führte zu der kritischen Frage, wie belastbar die Daten sind und wie zeitnah sie tatsächlich entstehen. Nachteilig seien der geringe Automatisierungsgrad der Erfassung sowie die hohe Fehleranfälligkeit, weshalb eine Unterstützung mittels automatisierter Erfassungsmethoden zukünftig notwendig ist. (Vgl. Ailland, 2013, S. 71 ff.)

In der Operative erfolgt die Dokumentation des Baufortschritts i.d.R. visuell, zumeist über stichprobenhafte Vermessungen und Lichtbildaufnahmen. Dies führt in Hinblick auf die vollständige und digitale Archivierung sowie die juristische Belastbarkeit meist zu Problemen. (Vgl. Wujanz und Clemen, 2019, S. 1) Da sich spezielle ortsbezogene Umstände oft erst nach dem Baubeginn herauskristalisieren, liegen eher keine exakten Ausführungsmengen vor, was zu einer erschwerten Leistungserfassung im Tiefbau führt. (Vgl. Oepen, 2003, S. 43) Weiterführende Probleme ergeben sich aus der zeitlich verzögerten Datenabbildung in unterschiedlichen Systemen, was die stichtagsbezogene Steuerung deutlich erschwert. Das effiziente Controlling ergibt sich jedoch nur aus der frühen Erhebung von validen Ist-Daten. (Vgl. Günthner und Borrmann, 2011, S. 276)

Aus den vorigen Abschnitten 2.1.1 bis 2.1.6 lassen sich folgende Anforderungen an einen erfolgreichen Controllingansatz stellen.

- Aktuelle und zügige Übermittlung von Daten
- Festlegung von Toleranzgrenzen für gegebene Abweichungen
- Kosten-/Terminkontrolle sowie Kosten-/Termintransparenz in allen Projektphasen

(Vgl. Leimböck et al., 2015, S. 7)

Mit dem Einsatz digitaler Planungs- und Erfassungsmethoden können die Bauvertragspartner diesen Anforderungen gerecht werden. Nach Leimböck et al. liegt die bislang geringe Verbreitung des Projektcontrollings und einer 3D-Projektanbahnung in der Bauwirtschaft an den ständig wechselnden Produktionsbedingungen. (Vgl. Leimböck et al., 2015, S. 7)

## **2.2 Modellbasierte Projektanbahnung**

Um so früh wie möglich eine aktuelle Abweichungsanalyse zwischen Soll und Ist erstellen zu können bedarf es einer digitalen Lösung, die es ermöglicht, vor Ort – auf der Baustelle – Daten zu erfassen. Dies gelingt über eine Planungssoftware oder ein Bauwerksinformationsmodell (Building Information Modeling – BIM). (Vgl. Hofstadler, 2019, S. 811) Für modellbasiertes Projektcontrolling im Infrastrukturbau haben sich international teilweise spezifische Begriffe etabliert – u. a. Bridge Information Modeling im Brückenbau. (Vgl. Marzouk und Hisham, 2014, S. 18). In Deutschland ist solch eine Unterteilung in einzelne Sparten eher selten; daher werden im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich die Bezeichnungen *BIM* und *modellbasierte Projektanbahnung* verwendet. (Vgl. Heyl, 2019, S. 70) Die Verknüpfung der Daten von allen Projektbeteiligten in einem Informationsmodell, welches allen zur Verfügung steht, erleichtert den Informationsaustausch, verringert den Datenverlust und stellt den größten Mehrwert hinsichtlich Effektivitätssteigerung und Qualitätsverbesserung dar. Alle am Bau Beteiligten und weitere Fachdisziplinen können einbezogen werden. Dies erfordert eine kollektive Arbeitsweise und unterstützt eine verbesserte Projektkommunikation. Zweifelsohne ergeben sich für die Projektorganisation neue Anforderungen hinsichtlich technischer, organisatorischer und rechtlicher Natur. (Vgl. Silbe und Díaz, 2017, S. 49)

### **2.2.1 Basis der Objekt- und Datenmodellierung**

Eine modellbasierte Projektanbahnung und ein systemübergreifendes Projektcontrolling erfordern, dass projektrelevante Daten und Informationen mit einem hohen Maß an Universalität, Modularität und Kompatibilität bereitgestellt werden. Nur dies ermöglicht eine integrale Abbildung der Projektgegebenheiten und durchgängige Informationsverwendung. (Vgl. Tulke und Schumann, 2018, S. 293 f.) Grundlage ist eine systematische Objekt- und Datenmodellierung. (Vgl. Heyl, 2019, S. 70)

Die vereinfachende Beschreibung der komplexen Realität ist das Ziel einer objektorientierten Modellierung. Durch hierarchische Strukturierung von unterscheidbaren Objekten mittels spezifischer Eigenschaften, statischer Attribute und dynamischer Operationen werden diese beschrieben. Einzelne Objekte können zu übergeordneten Objekten aggregiert werden (bspw. bei Bauteilen). Sinnvoll können auch Objektkompositionen sein, bei denen Einzelteile nicht ohne das Ganze existieren können oder erst zusammengestellt werden, bspw. bei Schichten einer Bodenauffüllung. Objekte mit gleichen Attributen werden zu Klassen zusammengefasst. Objektbeziehungen können zusätzlich zu den Klassen über definierte Schnittstellen abgebildet werden. Dadurch werden assoziative Aktualisierungen von Informationen ermöglicht. (Vgl. Artus et al., 2021, S. 61 ff.)

### **2.2.2 Geometrische und parametrische Modellierung**

Die dreidimensionale Abbildung einer Bauwerksgeometrie wird als geometrische Modellierung bezeichnet. Über Punkte, Kurven, Oberflächen und Volumenkörper wird das Modell

beschrieben. Es werden grundsätzlich zwei Verfahren unterschieden: das explizite Verfahren mit der Beschreibung eines Körpers über die Oberflächen und das implizite, prozedurale Verfahren mit der Beschreibung der Geometrie über Modellierungsschritte. Über explizite Begrenzungsflächenmodelle lassen sich auch einfache Körpergeometrien modellieren. (Vgl. Borrmann und Berkahn, 2018, S. 29 f.) Komplexe Geometrien von inhomogenen Erdkörpern oder von gekrümmten bzw. schrägen Ebenen erfordern implizite Verfahren. Implizite Verfahren werden bspw. auch für Geländemodellierungen (u. a. triangulierte Oberflächennetze) verwendet. (Vgl. Borrmann und Berkahn, 2018, S. 37 f.)

Sofern Modellelemente miteinander zu einem flexiblen Modell verknüpft werden, spricht man von parametrischer Modellierung. Diese erfolgt über die Definition von Beziehungen und Bedingungen zwischen bestimmten Parametern der Modellelemente. Die Geometrien werden implizit über die Parametrik und über Algorithmen beschrieben, um flexible Modellanpassungen zu ermöglichen. (Vgl. Borrmann und Berkahn, 2018, S. 35 f.) Standardisierte, geometrisch flexible Produktmodelle für Objektbibliotheken können hiermit ermöglicht werden. (Vgl. Schreyer und Pflug, 2018, S. 417; Heyl, 2019, S. 71)

### 2.2.3 Metadaten

Basis einer einheitlichen Organisation der Informationsressourcen bieten Metadatenschemata, die traditionell eine Reihe einfacher Attribute, die unterschiedliche Aspekte einer Ressource repräsentieren, definieren. (Vgl. Schapke et al., 2018, S. 253) Nachfolgende Tabelle 3 repräsentiert die Mindestanforderungen nach Schapke et al.

**Tabelle 3: Mindestanforderung an Metadaten**

Klasse der Metadaten	Vokabularbeschreibung
Identifizierung	Autor, Bearbeiter, Modellelement, Speicheradresse, ID
Inhaltliche Beschreibung	Sachgebiet, Projektphase, Detaillierungsgrad, Bearbeitungsstatus
Technische Beschreibung	Software, Dateiformat, Dateigröße
Funktionale Beschreibung	Versions-, Revisionsnummer, Bearbeitungsstatus
Konservierung	Sicherungskopien, Archivierungspfad, Migrationsinformationen

Quelle: In Anlehnung an Schapke et al., 2018, S. 253; Heyl, 2019, S. 72; Demharter et al., 2014a, S. 54

Merkmalskataloge sind eine weitverbreitete Form ergänzender Modellspezifikationen und werden als Meta- oder Attributkataloge bezeichnet. Mit diesen werden die Attributierung und die Annotation der Modelle im Unternehmen oder im Projekt harmonisiert. Um Objekte und Informationen übergeordnet über Attribute anzuordnen und in Verbindung setzen zu können, werden Metadaten verwendet. Die Kennzeichnung einzelner Modellobjekte wird über einen globalen Identifikator, den Globally Unique Identifier (GUID), organisiert. Ergänzende Namenskonventionen, Werte- und Anwendungsbereiche für einzelne Attribute sind im Metadatenkatalog festzuhalten. Es muss darüber hinaus festgelegt werden, für welche Fachmodelle oder Fachmodellteile und Anwendungsbereiche diese Vorgaben gelten. (Vgl. Scherer und Schapke, 2014, S. 25)

Durch diese Verwendung wird ein elementbezogener und projektübergreifender Informationsaustausch über mehrere Modelle, Modellfortschreibungen, Systeme oder Ordnungsstrukturen hinweg ermöglicht. (Vgl. Schapke et al., 2018, S. 253 f.)

#### **2.2.4 Datenschnittstellen und Interoperabilität**

Aufgrund der fragmentierten und dynamischen Umgebung eines Bauprojektes sowie der heterogen zusammengesetzten Softwarelandschaft, speziell im Tiefbau, ist ein hohes Maß an Interoperabilität erforderlich. Daten und Informationen diverser Organisationseinheiten mit teilweise sehr unterschiedlichen Informationssystemen aufzubereiten, zusammenzuführen und auszutauschen muss gewährleistet sein. Dies bedarf standardisierter Datenformate für einen durchgängigen und verlustfreien Austausch von trassenspezifischen Daten. (Vgl. Obergrießer, 2017, S. 21) Über proprietäre (native) oder neutrale Datenformate wird ein verlustfreier Austausch ermöglicht. Prinzipiell ist die Verwendung von herstellerneutralen Austauschformaten anzustreben. Ein proprietärer Datenaustausch erfolgt innerhalb einer Softwarefamilie und erhöht die Abhängigkeit von einzelnen Herstellern. Außerdem verbietet sich bei öffentlichen Bauvorhaben aus wettbewerblichen Gründen die Festschreibung von bestimmten zu verwendenden Softwareprodukten. (Vgl. Borrmann et al., 2018, S. 83 f.) Da der Straßen- und Tiefbau von öffentlichen Projekten geprägt ist, sollte einer Produktneutralität ein Gebot sein.

Wesentliche offene und neutrale Datenformate sind Extensible Markup Language (XML), JavaScript Notation (JSON) und das Datenschema Industry Foundation Classes (IFC). XML bildet einen internationalen, hierarchisch aufgebauten Auszeichnungsstandard zur Beschreibung von Objekten, der einen flexiblen Datenaustausch ermöglicht. LandXML (zur Beschreibung von georeferenzierten Objekten) sowie CpiXML (welches beim modellbasierten Datenaustausch im Rahmen der Kalkulation, Ausführung oder Abrechnung zum Einsatz kommt) sind dessen Ausprägungen. JSON beinhaltet im Gegensatz zu XML keine Auszeichnungen und basiert auf einer Syntax-Konvention. Es wird meist bei einfachen starren Schnittstellen eingesetzt. Einen konsistenten geometrischen sowie semantischen Datenaustausch ermöglicht das IFC-Datenmodell, welches bereits als vierte Version (IFC4) vorliegt. (Vgl. Heyl, 2019, S. 72; Obergrießer, 2017, S. 21 f.; ISO 16739:2013-04, 2013, S. 1 ff.)

Bei herstellerneutralen Projekten hat sich das IFC-Datenmodell international als Standard etabliert (Vgl. Borrmann et al., 2018, S. 86). IFC-Daten können im XML-Format (ifcXML) zur Verfügung gestellt werden (Vgl. Borrmann et al., 2018, S. 122 f.). Zur Übermittlung von modellbezogenen Nachrichten wird das BIM Collaboration Format (BCF) herangezogen. Dies ist ebenso ein XML-basiertes Datencontainerformat. Über den GUID wird die Nachricht dann einem bestimmten Modellelement zugeordnet. Die gesamte IFC-Datei der betroffenen Modellelemente oder nur Ausschnitte davon können dem Datencontainer beigefügt werden. (Vgl. Steinmann, 2018, S. 151) Die Entwicklung und Erweiterung der IFC für den Infrastrukturbereich ist Gegenstand einiger Forschungsarbeiten. IFC-Alignment wurde zur Beschreibung und räumlichen Verortung von Straßen- und Schienentrassen entwickelt. (Vgl. Amann und Borrmann, 2015, S. 2 ff.) Darauf aufbauend gab es eine Vielzahl an infrastrukturenspezifischen Erweiterungen wie IFC-Rail, IFC-Road, IFC-Bridge, IFC-Tunnel und

IFC-Ports & Waterways. (Vgl. Jubierre und Borrmann, 2014, S. 4 ff.; Hegemann et al., 2012, S. 289 ff.) Weiterführende Informationen und Funktionsweisen der diversen IFC-Daten im Infrastrukturbau können König et al. entnommen werden. (Vgl. König et al., 2018, S. 61 ff.) In den IFC-Infra Common Definitions werden laufende internationale Entwicklungsaktivitäten gebündelt. Über die IFC-Erweiterungsmechanismen werden länderspezifische Erweiterungen abgebildet, die nicht allgemeingültig formulierbar sind. Ziel ist die Integration wesentlicher Elemente bestehender deutscher Infrastrukturdatenstandards – Beispiele sind der Objektkatalog für das Straßen- und Verkehrswesen (OKSTRA), die Standards des gemeinsamen Ausschusses für Elektronik im Bauwesen (GAEB) oder die Anweisung Straßeninformationsbank für Ingenieurbauten (ASB-ING). (Vgl. Jaud und Weise, 2019, S. 5 ff.) Weitere Datenformate, die bei modellbasierten Infrastrukturprojekten zum Einsatz kommen, sind spezielle Formate wie City GML zum Austausch von Raum- und Siedlungsstrukturdaten oder allgemeine Formate wie das Portable Document Format (PDF), mit Vektorinformationen angereichert oder georeferenzierte Rasterbilder in diversen Fotoformaten. Weitere zu integrierende nationale Infrastrukturdatenstandards können dem Stufenplan *Digitales Planen und Bauen* und dessen Fortschrittsbericht sowie bei Heyl entnommen werden. (Vgl. Heyl, 2019, S. 73 f.; BMVI, 2017, S. 10 ff.)

### **2.2.5 Modellbasierte Arbeitsmethodik**

Die modellbasierte Arbeitsmethodik unterscheidet sich grundlegend zu konventionellen Herangehensweisen. Aufgrund einer gemeinsamen Datenbasis werden divergente Teilplanungen frühzeitig sichtbar. Dies führt zu einer Vorverlagerung des Planungsaufwandes und zur besseren Zusammenarbeit der Projektbeteiligten bei gleichzeitiger Erhöhung der Planungszuverlässigkeit und -qualität. (Vgl. Egger et al., 2013, S. 28 ff.) Ebenfalls unterstützt die Arbeitsmethodik ein strukturiertes und konsequentes Vorgehen. Dies verbessert die Vollständigkeit und Richtigkeit der einzelnen Elemente und damit die der verknüpften Informationen. (Vgl. Kaminski, 2010, S. 155 ff.)

Die modellbasierte Arbeitsweise findet in der Ausführungsphase von Infrastrukturprojekten bisher nur geringe Anwendung und beschränkt sich auf einzelne Fertigungsschritte. Nach Heyl ist hierfür die Verknüpfung der objektorientierten Produktsicht mit der prozessorientierten Projektsicht erforderlich. Prozesse des Handlungsträger-, Handlungs- und Produktsystems sind so auszugestalten, dass verschiedene semantische heterogene, de- bzw. präskriptive Fachmodelle zu einer durch die unterschiedlichen Projektrollen individuell nutzbaren Datenbasis verflochten werden. (Vgl. Heyl, 2019, S. 75) Prozesse und Prozessgruppen sind über eindeutige Aufgaben, Kompetenzen und Verantwortlichkeiten den Berechtigungsrollen zuzuordnen und zu einer durchgängigen digitalen Wertschöpfungskette zu verknüpfen. (Vgl. Greiner und Scherer, 2014, S. 156) Im Rahmen des ganzheitlichen untersuchten Ansatzes wird für das Projektcontrolling in der Ausführungsphase die Fortschritts-, Termin- und Kostenkontrolle als zu untersuchender Forschungsstand dokumentiert. (Vgl. Heyl, 2019, S. 77)

### **2.2.6 Multimodellkonzept**

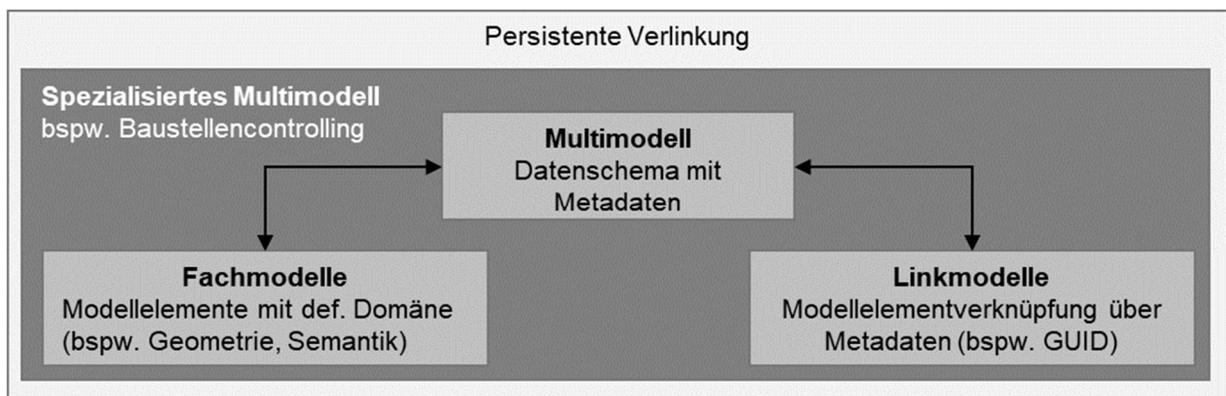
Die Idee einer gemeinsamen Datenbasis, auf die alle Projektbeteiligten parallel zugreifen können, ist gerade im Verkehrswegebau noch Utopie. Die Realität zeigt die Nutzung von unabhängigen, für spezifische Domänen und Anwendungen eingesetzten Fachmodellen,

deren semantische Strukturen und Dateiformate heterogen und in geringem Maße interoperabel sind. (Vgl. Heyl, 2019, S. 79 f.; Schapke et al., 2018, S. 254 ff.)

Die Einordnung der Fachmodelle in das Projektgeschehen erfolgt über Metadaten (Abschnitt 2.2.3), welche inhaltliche Aussagen und die Validierung der Modellinformationen ermöglichen, ohne das zutreffende Fachmodell öffnen zu müssen. (Vgl. Heyl, 2019, S. 80)

Um Konsistenzbrüche und Widersprüche (bspw. geometrische Konflikte) zu identifizieren oder Projektinformationen auszuwerten, werden mehrere Fachmodelle zu einem Koordinationsmodell übereinandergelegt. (Vgl. Schapke et al., 2018, S. 258) Die Praktikabilität von Koordinationsmodellen wird bei der strukturellen und semantischen Ungleichheit der Fachmodelle wesentlich reduziert. (Vgl. Scherer und Schapke, 2014, S. 5 f.)

Über die GUID können persistente Links zwischen diversen Modellelementen eingerichtet werden; sie stellen eine formalisierte Beschreibung dar. (Vgl. Demharter et al., 2014a, S. 39 ff.) Datenaustausch und Informationsauswertungen werden über mehrere heterogene Fachmodelle ermöglicht. Ein Eingriff in die zugrunde liegende Datenstruktur der Fachmodelle ist nicht nötig. Ohne Modellübereinanderlegung wird hiermit eine prozessorientierte, domänenübergreifende Auswertung von Modellinformationen ermöglicht und heterogene Fachmodelle können zu Multimodellen verknüpft werden. (Vgl. Scherer und Schapke, 2014, S. 32 f.) Mit der gezielten Kombination von Multi-, Fach- und Linkmodellen können durch persistente Verlinkungen (Abbildung 11) ausgewählte Objekte für bestimmte Anwendungsfälle oder Projektszenarien vormodelliert werden und gehen so als spezialisiertes Multimodell hervor. (Vgl. Demharter et al., 2014a, S. 39 ff.; Demharter et al., 2014b, S. 204). Es ist somit kein integrierendes übergeordnetes Datenschema erforderlich; trotzdem werden durch semantische Spezifikationen anwendungsfallbezogene Homogenisierungen der Modellinhalte gewährleistet und können parallel genutzt werden. (Vgl. Schapke et al., 2014, S. 87 f.) Relevante Anforderungen für den Datenaustausch von Bauwerksmodellen über Linkmodelle sind im Standard DIN SPEC 91350:2016-11 erarbeitet. (Vgl. DIN SPEC 91350:2016-11, 2016, S. 4 f.) Eine mit XML oder JSON dargestellte Beschreibung (Metadaten), welche flexibel kombinierbare Inhalte interpretierfähig wiedergibt, wurde für den Austausch von Multimodelldaten als Multimodellcontainer entwickelt. Der Austausch erfolgt über komprimierte Dateien. (Vgl. Demharter et al., 2014a, S. 50; Schapke et al., 2014, S. 87)



**Abbildung 11: Spezialisiertes Multimodell**

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Heyl, 2019, S. 82; Demharter et al., 2014a, S. 42 ff.

Heyl identifiziert für die modellbasierte Projektabwicklung von Verkehrsinfrastrukturprojekten, neben dem Bauwerksmodell, folgende vier Modellarten und gibt ausführliche Informationen zu deren Inhalt und Anwendung.

- Trassenmodell
- Geländemodell
- Baugrundmodell
- Baustellenmodell

Die Modelle sollten parametrisch modelliert und verknüpft werden, um flexible Planungsanpassungen zu ermöglichen. (Vgl. Heyl, 2019, S. 81 f.) Zu beachten bei Modellen von Verkehrsinfrastrukturbauwerken ist, dass sowohl globale geodätisch als auch lokale kartesische Koordinatensysteme zum Einsatz kommen. Es erfolgt aufgrund der gegebenen Erdkrümmung eine großräumige Georeferenzierung über ein Geoinformationssystem (GIS). Für die objektorientierte Volumenkörperdarstellung wird ein über GIS-Referenzpunkte verortetes lokales Koordinationssystem verwendet. (Vgl. König et al., 2018, S. 60)

Einige Informationen lassen sich nicht geometrisch referenzieren. Hier steigt das Risiko, dass Daten mit sinkender visueller Repräsentation nicht ausreichend berücksichtigt und plausibilisiert werden. (Vgl. Hienz und Scherer, 2014, S. 173) Um eine Berücksichtigung bestimmter Projektdaten in den jeweiligen Projektprozessen zu gewährleisten, ist die formale Abbildung in semantischen Modellen erforderlich. (Vgl. Artus et al., 2021, S. 53 f.) Im Kontext der Aufgabenbereiche des Projektcontrollings bzw. Baustellencontrollings werden vier semantische Modelle unterschieden, die ebenfalls von Heyl ausführlich beschrieben sind.

- Organisationsmodell
- Terminmodell
- Kostenmodell
- Leistungsfeststellungsmodell

(Vgl. Heyl, 2019, S. 86 ff.)

Zentrales Element stellt eine Datenbank dar – eine projektübergreifende und logisch vernetzte Wissensressource. Diese enthält baurelevante Konzepte und Ordnungsstrukturen und unterscheidet gemäß ISO 12006-3:2007-04 zwischen Produkten, Prozessen und Ressourcen. (Vgl. ISO 12006-3:2007-04, 2007, S. 5 f.)

- Produkte stellen parametrische Materialien, Bauteile, Bauteilgruppen und übliche Aufbauten (bspw. den Schichtenaufbau im Straßen- und Tiefbau) dar und enthalten Eigenschaften über Attribute und Verhaltensregeln in verschiedenen Detaillierungsstufen. (Vgl. Beetz, 2021, S. 217 ff.; Heyl, 2019, S. 86)
- Prozesse beschreiben eine logische Beziehung und Abfolge. Ein Referenzprozess enthält die erforderlichen Arbeitsschritte mit Aufwandswerten und Ressourcenanforderungen, die in dieser Weise wiederholt für Bauwerkselemente auftreten. Die Beschreibung erfolgt generisch, modular und regelbasiert, um eine projektübergreifende Wiederverwendung zu ermöglichen. (Vgl. Habenicht et al., 2014, S. 84 ff.; Ismail und Scherer, 2014, S. 109 ff.)
- Ressourcen bilden die Basis der Prozesse. Eigenschaften, Kapazitäten und Verfügbarkeit physischer und digitaler Ressourcen werden über Kennwerte

beschrieben. Physische Ressourcen wie Personal, Maschinen und Material werden durch Qualifikationen und Anzahl beschrieben. (Vgl. Habenicht et al., 2014, S. 86 f.)

Eine zentrale Datenbank hat die Aufgabe, Datensätze projektübergeordneter hierarchischer Projekt- und Produktklassifikationen, Prozessmuster für ein- oder mehrteilige Aktivitäten sowie relevante Kennwerte maschinenlesbar abzubilden. Ein modularer Aufbau, eine eindeutige Kennzeichnung der Datenbankelemente durch den GUID sowie ein hohes Maß an Dateninteroperabilität ermöglichen Datensätze und relevante Fachmodelle flexibel zu kombinieren, um den immateriellen und materiellen Herstellungsprozess zu beschreiben (Abschnitt 2.2.3 und 2.2.4). (Vgl. Beetz, 2021, S. 217 f.; Heyl, 2019, S. 86)

Kompatible semantische Beschreibungen sind in der DIN SPEC 91400:2015-01 zusammengefasst, um Bauprodukte und ihre Beschreibungsmerkmale zu klassifizieren. Es ist ein bauteilorientiertes Klassifikations- und Beschreibungssystem für BIM, das mit Syntax und Semantik von IFC vereinbar ist. Auf Basis des STLB-Bau (Standardleistungsbuch für das Bauwesen) legt diese Spezifikation einen Katalog klassifizierter Bauteilgruppen mit ihren wesentlichen charakteristischen Beschreibungsmerkmalen und Ausprägungen fest. Ansätze zur Einbindung von internationalen und nationalen Normen-, Baustoff- oder Herstellerkatalogen werden darauf aufbauend erarbeitet. (Vgl. DIN SPEC 91400:2015-01, 2015, S. 4 ff.; Beetz, 2021, S. 218 f.) Eine Weiterentwicklung für den bei Verkehrsinfrastrukturprojekten verwendeten STLK (Standardleistungskatalog für den Straßen- und Brückenbau) liegt derzeit nicht vor. Stattdessen sind vorhandene Standards (bspw. OKSTRA) kompatibel einzubinden (Abschnitt 2.2.4). Zugehörige Ressourcen- und Prozessinformationen können durch Einbindung der komplementären Datenquellen einbezogen werden. Aufgrund des hohen Wiederholungsgrades und der häufig modularen Zusammensetzung birgt diese Vorgehensweise bei Verkehrsinfrastrukturprojekten ein hohes Potenzial. (Vgl. Heyl, 2019, S. 89 f.; Blickle et al., 2014, S. 173)

### **2.2.7 BIM in der Ausführungsphase ausführender Tief- und Straßenbauunternehmen**

Der Prozess der Baufortschrittskontrolle und Leistungsmeldung während der Bauausführung ist für die vorliegende Arbeit relevant. Hier gibt es bisher nur wenige Untersuchungen im Segment des Straßen- und Tiefbaus. Deshalb soll der im Rahmen der Arbeit entwickelte Prozess dahingehend untersucht und validiert werden. Entscheidende Unterschiede zum Hochbau sind folgende:

- Aufgrund einer deutlich größeren geografischen Ausdehnung von Infrastrukturmaßnahmen gegenüber Hochbauprojekten muss das geodätische Bezugssystem mit seinen Abbildungseigenschaften berücksichtigt werden.
- Lineare Infrastrukturprojekte basieren in ihrer Ausgestaltung auf einer Trassierung. Trassierungskurven (Trennung in Lageplan und Längsprofil) und die Möglichkeit der linearen Verortung entlang der Achse und dem rechtwinklig vorgenommenen seitlichen Ab- und Auftrag sind wesentliche Voraussetzungen für die exakte Modellierung.
- Aufgrund der geografischen länglichen Ausdehnung der Bauteile im Straßen- und Tiefbau sind diese in geeignete Abschnitte zu unterteilen. Eine über mehrere hundert Meter oder Kilometer herzustellende Straßenschicht wird über Wochen bzw. Monate erbaut; für die korrekte Anwendung der BIM-Methodik muss das Bauteil unterteilbar in Bezug zur geplanten Fertigstellungsdauer sein. Für die Meldung der Fertigstellung ist

dies unerlässlich, denn wenn das Bauteil nicht unterteilt ist, kann die Fertigstellung erst am Ende der Maßnahme gemeldet werden, obwohl bereits Leistungen angefallen sind.

- Softwaretools der Trassenplanung sind nur bedingt geeignet für bestimmte BIM-Anwendungsfälle, da Schichten eines Straßenkörpers nicht als 3D-Volumenkörper modelliert sind, sondern durch Flächen im 3D-Raum beschrieben werden. Deshalb hat sich ein hybrider Ansatz etabliert, bei dem der Trassenentwurf mit konventionellen Werkzeugen erfolgt und anschließend per neutralem Datenaustauschformat in 3D-Modellierungsprogramme übertragen wird.

Aufgrund der vorgenannten Punkte sind die heutzutage verfügbaren Werkzeuge aus dem Bereich BIM im Hochbau nur begrenzt im Infrastrukturbereich einsetzbar. Häufig sind zusätzliche Programmierungen erforderlich, bspw. um eine Geometrie an der Trasse auszurichten. (Vgl. Borrmann und Heunecke, 2019, S. 33 f.) Die wichtigste Eingangsgröße zur Verwendung eines 3D-Modells und der Anwendung der BIM-Methodik ist ein 3D-Geländemodell. Zur Absteckung des Straßenentwurfs kann das entsprechende 3D-Modell wiederum in Vermessungsgeräte eingespielt werden. (Vgl. König et al., 2018, S. 23 ff.)

Das Positionspapier *BIM im Straßenbau* greift diverse Anwendungen und deren Potenzial auf. Es werden Forderungen für deren Realisierung benannt sowie kurz- und mittelfristige Umsetzungsspielräume aufgezeigt. Enthalten sind ebenso Anforderungen an die Datenaustauschformate und Modellinhalte. (Vgl. Arbeitskreis Digitalisiertes Bauen, 2019, S. 6 ff.) Innovative mittelständische Unternehmen haben sich durch den frühen Einsatz der BIM-Methode einen Wettbewerbsvorteil erarbeitet, mittels der Entwicklung spezieller Werkzeuge für unternehmensinterne Prozesse, die auf das BIM-Modell zurückgreifen. (Vgl. König et al., 2018, S. 133 ff.)

Im Rahmen der Bauausführung liegen bei der Bereitstellung eines digitalen Geländemodells die Vorteile im Wesentlichen in der erleichterten Aufwandsermittlung, in der präzisen Abrechnung und der Mängelverfolgung. Die Verknüpfung eines Bauteils mit dem entsprechenden Vorgang des Bauablaufplanes wird als 4D-BIM bezeichnet. Dadurch ist das frühzeitige Erkennen von Konflikten und eine verbesserte Koordination der Baustelle möglich. (Vgl. Borrmann, 2018, S. 9 f.) Mobile Geräte und der Einsatz von BIM bieten durch die Vernetzung von Baustelle und Innendienst eine deutliche Erleichterung für diverse Prozesse in der Bauausführung. Aktuelle Informationen, Statusdaten oder Fotos können direkt auf der Baustelle aufgenommen und den Bauteilen des Bauwerkmodells zugeordnet werden. Minimiert werden Verwaltungsaufwand, Fehleranfälligkeit und Datenverlust. Redundante Datenübergaben erübrigen sich und es kann eine Verkürzung der Berichtszeiträume erreicht werden. (Vgl. Schreyer, 2016, S. 43 f.)

Im Zuge des Baustellen-Controllings besteht die Möglichkeit, über diverse BIM-fähige Projektbearbeitungsprogramme Berichtszeiträume festzulegen, welche eine Stichtagsbetrachtung im Rahmen der Soll- und Ist-Leistungen der Kosten, Mengen und Stunden ermöglichen. Ist der Berichtszeitraum identisch mit dem Abrechnungszeitraum, können Abrechnungsmengen ebenfalls übernommen werden. Für den Soll-Ist-Vergleich ist das Datenmodell mit dem Bauablaufplan und der Arbeitskalkulation verknüpft und kann für eine grafische Aufbereitung fortgeschrieben werden. (Vgl. Silbe und Díaz, 2017, S. 103)

Die Verknüpfung des 3D-Modells mit dem Bauablaufplan (4D) und der zugehörigen (Arbeits-) Kalkulation wird als 5D-Modell bezeichnet. (Vgl. Schreyer, 2016, S. 46) Die Soll-Ist-Werte können zum einen tabellarisch gegenübergestellt oder auch nach Fertigstellungsgrad im Bauwerksmodell farblich visualisiert werden. Die Ist-Werte folgen zumeist aus händischen Eingaben. Das modellbasierte Controlling zeigt sich als vorteilhaft in der Lokalisierung und Visualisierung der Bauleistung. Durch visuelle Darstellung von Störungen im Bauablauf können frühzeitig geeignete Gegenmaßnahmen erkannt und ergriffen werden. (Vgl. Silbe und Díaz, 2017, S. 103 ff.) Der Erstellungsaufwand der Leistungsmeldung kann verringert und zugleich die Detailliertheit der Auswertung erhöht werden. Technische und kaufmännische Betrachtungen können anhand des 5D-Modells transparent und durchgehend miteinander verbunden werden und tragen zu einem effektiven und effizienten Prozess bei. (Vgl. Schreyer, 2016, S. 46 f.)

Um fehlende oder doppelte Zuweisungen zu vermeiden, sind bislang noch Kontrollen der Prozesse erforderlich. Zuweisungen werden meist noch manuell, durch händische Eingaben, oder für einzelne Prozesse teilautomatisiert abgebildet. Die Bestrebung einer automatisierten Erfassung der Ist-Daten ist daher von großer Relevanz. Nachfolgende Kapitel beschreiben Möglichkeiten einer automatisierten Erfassung mittels diverser Methoden.

### **2.3 Erfassungsmethoden des IST-Zustandes**

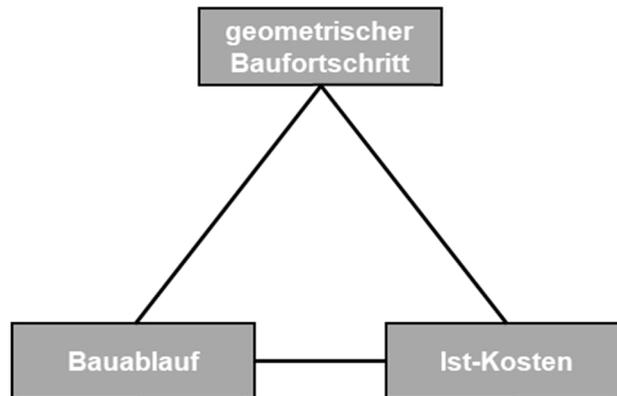
Mit Einsatz technischer Anwendungen sind vielseitige Möglichkeiten zum automatisierten Erfassen von Daten gegeben. Entsprechende Instrumente zur Datenerfassung reduzieren Verschwendungen bei informationsverarbeitenden Prozessen in erheblichem Umfang. Kommunikation, Analyse und Speicherung der Daten kann vereinfacht und beschleunigt werden. Durch eine schnelle Datenverarbeitung wird das Controlling von Baumaßnahmen schlagfertiger. In den letzten Jahren wurden diverse Herangehensweisen zur Abbildung des Ist-Zustandes einer Baumaßnahme untersucht. (Vgl. Walther und Bargstädt, 2019, S. 1567 ff.) Folgend sollen jeweilige Erfassungsmethoden hinsichtlich ihrer grundsätzlichen Funktionsweise zur Feststellung des Baufortschrittes kurz erörtert werden. Aufgrund der aktuellen Dynamik des Themas wurden ebenso internationale Veröffentlichungen berücksichtigt.

Erste Rechercheergebnisse zu diversen Erfassungsmethoden wurden bereits in Walther (2019) veröffentlicht. In einem modellbasierten Konzept wurde festgehalten, für welchen Einsatz sie geeignet und welche Ist-Daten im Straßen- und Tiefbau zu erfassen sind. Die benötigten Rahmendaten ergeben sich aus der KLR Bau. Die Erfassungsmethoden und Techniken werden den standardisierten Kostenarten nach KLR Bau zugeordnet. Diese ergeben somit Rückschlüsse auf die Ist-Kosten. Auch wurden Methoden zur Erfassung von Zeiten und Dauern und des hergestellten Bauteils/Objektes identifiziert. (Vgl. Walther, 2019, S. 335) Ziel war nicht die Erfassungsmethode an sich, sondern die Baustelle und deren Eigenarten. Dies betrifft die Frage, welche Daten für die Darstellung des Ist-Zustandes einer Baumaßnahme notwendig sind und mit welchen automatisierten Erfassungsmethoden diese bewältigt werden können. Es lassen sich drei Bereiche identifizieren, um den Ist-Zustand einer Baustelle wiedergeben zu können.

- Bauteil/Objekt – geometrische Analyse des Baufortschritts

- Bauablauf/die Zeit – ist der Bauvorgang im geplanten zeitliche Soll
- Ist-Kosten – Liegen die angefallenen Ist-Kosten, in Anbetracht aller angedachten Ressourcen, im geplanten Soll

Für die Auswertung des Ist-Zustandes müssen die drei Bereiche zusammen und in Abhängigkeit voneinander betrachtet werden (Abbildung 12).



**Abbildung 12: Auswertung des Ist-Zustandes**

Auf Basis der Strukturierung in drei Bereiche wurden diverse Technologien zur automatisierten Erfassung identifiziert. Abbildung 13 unterteilt und strukturiert mögliche Erfassungssysteme nach Art der Information, welche durch Objekt-ID, Bauteilgeometrie und Koordination bzw. Position beschrieben werden kann sowie nach Identifikation und Ortung. (Vgl. Binder, 2014, S. 61) Es werden deren Anwendungsbereich sowie der Geräte- und Auswertungsaufwand dargestellt. Die Anwenderhäufigkeit und die Höhe der Anschaffungskosten sind vollständigshalber zusätzlich angegeben.

Ein Überblick zu themenrelevanten Forschungsarbeiten wird bereits in Walther und Bargstädt gegeben. (Vgl. Walther und Bargstädt, 2019, S. 1569) Im Folgenden werden die Erfassungsmethoden nach den jeweiligen Identifikationsbereichen analysiert.

Technologien zur automatisierten Datenerfassung im Infrastrukturbau						
Identifikation					Ortung	
Objekt-ID		Bauteilgeometrie			Koordination/ Position	
Barcode QR-Code	RFID	Tachymeter	Laserscan	Photo- grammetrie	Lokale Ortungs- systeme	Globale Ortungs- systeme
Anwendungsbereich						
Personal, Geräte, Material, Dokumente, Vorgänge		Bauteil			Personal, Geräte, Material, Vorgänge	
Auswertungsaufwand						
gering	gering	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch
Geräteaufwand						
gering	mittel	mittel	hoch	mittel	mittel	mittel
Anwenderhäufigkeit						
hoch	mittel	hoch	gering	mittel	mittel	gering
Anschaffungskosten						
hoch	mittel	gering	hoch	mittel	mittel	mittel

**Abbildung 13: Erfassungsmethoden zur automatisierten Abbildung des Bauzustandes**

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Heyl, 2019, S. 99; Walther, 2019, S. 327; Omar und Nehdi, 2016, S. 146 ff.; Binder, 2014, S. 60 ff.; Ailland, 2013, S. 76 ff.

### 2.3.1 Objektidentifikation

Automatische Identifikationssysteme (Auto-ID-Systeme) für die Prozessdatenaufnahme wurden für die stationäre Industrie entwickelt und auf den Bauprozess adaptiert. Es existieren neben Barcodes und Radio Frequency Identification (RFID) weitere Auto-ID-Systeme. (Vgl. Klaubert und Schneider, 2011, S. 238 ff.) In der Bauwirtschaft hat sich in den letzten Jahren die Nutzung von Barcodes und RFID-Tags für diverse Anwendungsfälle etabliert.

#### Barcode

Der Barcode ist ein eindimensionaler Code aus Strichen und Trennlücken welcher zu mehrdimensionalen Codes weiterentwickelt wurde. Der QR-Code (Quick Response Code) zählt zu den zweidimensionalen Codes. (Vgl. Finkenzeller und Gebhart, 2015, S. 2 f.) Wie auch andere mehrdimensionale Codes kann der QR-Code sowohl mit stationären oder mobilen Lasern als auch mit einer Kamera (bspw. per Smartphone) ausgelesen werden. Es werden die Muster erfasst und in elektronische Signale umgewandelt, welche als Ergebnis decodiert werden. Eine Beschreibung der Funktionsweise ist bspw. in Lenk zu finden. (Vgl. Lenk, 2007) Vorteil dieser Codes ist die kostengünstige Beschaffung sowie einfache Anbringung am Objekt und das einfache Auslesen. Der Anwendung auf der Baustelle sind gewisse Grenzen gesetzt, vor allem durch die Witterungsanfälligkeit sowie durch die Notwendigkeit des herzustellenden Sichtkontaktes zwischen Lesegerät und Empfänger. (Vgl. Klaubert und Schneider, 2011, S. 241 f.)

Die Forschung zu Barcodes befasst sich hauptsächlich mit technischen Neuerungen. Als Vertreter seien Langlotz und Bimber genannt, die sich mit der Maximierung der zu übertragenden Datenmenge beschäftigen. (Vgl. Langlotz und Bimber, 2013) Das Einsatzgebiet von Barcodes umfasst vor allem die Materialverfolgung und Bestandsaufnahme, die Baufortschritts- und Arbeitsverfolgung und die Erfassung von baurelevanten Dokumenten. (Vgl. Omar und Nehdi, 2016, S. 147). Eine standardisierte Nutzung von Codes wird seitens der deutschen Bauindustrie durch den Entwurf eines einheitlichen QR-Codes auf Lieferscheinen und Eingangsrechnungen angestrebt. (Vgl. Bauindustrieverband NRW e.V., 2018)

### RFID

Anders als bei Barcodes sind die Daten bei der Anwendung von RFID auf Transpondern gespeichert, die mittels Lesegerät über magnetische oder elektromagnetische Felder ohne direkten Sichtkontakt ausgelesen oder überschrieben werden. (Vgl. Finkenzeller und Gebhart, 2015, S. 11; Helmus et al., 2011, S. 5) Die Verwendung verschiedener Frequenzen ist möglich. So kann die Funktionsfähigkeit des RFID-Systems hinsichtlich der Empfindlichkeit gegenüber externen Einflüssen optimiert werden. In diesem Bereich konnten in den vergangenen Jahren Fortschritte erzielt werden, sodass der Einfluss von Umweltbedingungen der Anwendung auf der Baustelle nicht entgegenstehen. (Vgl. König et al., 2015, S. 14 ff.)

Valero et al. geben einen Überblick über die Entwicklungen des Einsatzes von RFID im Bauwesen. Innerhalb der Bauausführung wird auf die Anwendungsbereiche des Materialtrackings, der Baufortschrittskontrolle sowie der Kombination mit weiteren Erfassungsmethoden eingegangen. (Vgl. Valero et al., 2015, S. 15994 ff.) Nach Klaubert und Schneider sind die wesentlichen Einsatzbereiche im Bauprozess die Erfassung von Personaldaten und Materialien, die Verwaltung von Geräten und Maschinen und die entsprechende Zuordnung der zugehörigen Anbauteile, die Kennzeichnung von Betonelementen und nicht zu vergessen, der Einsatz eines Lagerverwaltungssystems. (Vgl. Klaubert und Schneider, 2011, S. 243 ff.). In Jehle et al. werden ein durchgängig digitaler Datenfluss und die Sicherstellung der Qualität der Dokumentation mittels Einsatz von RFID an realen Baustellen beschrieben. Der RFID-Einsatz im Zuge der BIM-Methodik findet ebenso Erwähnung. (Vgl. Jehle et al., 2013)

Mithilfe von Barcode- aber auch RFID-Lösungen ergibt sich die Möglichkeit der automatischen und sofortigen Erfassung sämtlicher Daten, die in der Folge an Subsysteme weitergeleitet werden können. (Vgl. Klaubert und Schneider, 2011, S. 240 ff.)

### **2.3.2 Bauteilidentifikation**

Mittels Tachymetrie, Laserscan oder Photogrammetrie können Bauteile identifiziert und darüber hinaus deren Abmessungen bzw. der Baufortschritt zu einem bestimmten Zeitpunkt ermittelt werden. Wichtig ist hierfür ein mathematisches Referenzsystem, das in der Lage ist, den übergeordneten Bezugsrahmen für die geometrische Dokumentation der Bauwerksbestandteile bereitzustellen. (Vgl. Blankenbach, 2018, S. 394 f.)

#### Tachymetrie

Ein Tachymeter bestimmt gleichzeitig Lage und Höhe eines Punktes, um horizontale Strecken, Höhenunterschiede und Koordinaten abzuleiten, die für weitere Berechnungen genutzt

werden. Dieses elektrooptische Distanzmessinstrument dominiert seit den 1970er Jahren das Arbeitsgebiet der Vermessung, wobei auch in diesem Bereich erhebliche technische Weiterentwicklungen erfolgten. Eine ausführliche Funktionsweise von Tachymetern ist bei Noack beschrieben. (Vgl. Noack, 2019, S. 153 ff.)

### Laserscan

Aufnahmen für kompliziert strukturierte Messobjekte (bspw. feingliedrig strukturierte Fassaden) werden heutzutage per Laserscan oder Photogrammetrie bewältigt. Die Aufnahme von hunderten, vor- oder zurücktretenden Punkten, die mittels Tachymetrie einzeln bestimmt werden müssten, verliert bei Laserscan ihren Schrecken.

Laserscanning ermöglicht eine Erfassung von zwei- und dreidimensionalen Objektinformationen zur Weiterverarbeitung in einer dreidimensionalen Punktwolke. Eine detaillierte Beschreibung zu Funktionsweise und Einsatz von Laserscans gibt Noack. Terrestrisches Laserscanning ermöglicht abschnittsweises Scannen mit geringer Datenmenge sowie eine vollautomatische 360° Abtastung der umgebenden Objekte. Im Straßen- und Tiefbau kann mobiles Laserscanning zur Vermessung von Straßenabschnitten eingesetzt werden. (Vgl. Noack, 2019, S. 160 ff.) Der hohe Aufwand der Datenaufbereitung sowie die große Datenmenge stehen der automatisierten und schnellen Erfassung entgegen. Nachteilig sind ferner hohe Anschaffungskosten bez. Scanner und zugehöriger Software. Nachteilig ist ebenfalls die Notwendigkeit einer klaren Sichtlinie sowie der sinkende Detaillierungsgrad der Aufnahme bei zunehmendem Abstand zwischen Scanner und Bauteil. Dies führte dazu, dass Laserscanning in der Baupraxis bis 2016 keine hohe Relevanz hatte. (Vgl. Omar und Nehdi, 2016, S. 148)

Die Kontrolle des Baufortschrittes zeigen Konzepte von Zhang und Arditi (2013), Turkan et al. (2012) sowie das ebenbasierte Verfahren nach Wujanz und Clemen (2019). Alle Autoren nutzen das Verfahren des Laserscans, um den aktuellen Baufortschritt aufzuzeigen. Dieser orientiert sich in der Regel immer an Hochbauten oder Ausbauprozessen. Ein Konzept zur Baufortschrittserkennung in Echtzeit durch die Zusammenführung von 3D-Scangeräten gewonnenen Daten in einem 4D-Modell stellten Pučko et al. auf. Die Arbeiter tragen Schutzhelme mit kleinen integrierten Laserscangeräten. Trotz begrenzter Präzision werden die partiellen Punktwolken zu einer vollständigen 4D-Punktwolke ausreichender Präzision (inkludiert Standort und Zeit) zusammengeführt. (Vgl. Pučko et al., 2018, S. 27)

### Photogrammetrie

Die Methode der Photogrammetrie ermöglicht die dreidimensionale Rekonstruktion eines Objekts, hervorgehend aus einer Fotoserie. Mit dieser 3D-Rekonstruktion wird ein digitales Modell des Bau-Ist-Zustandes erstellt und kann mit dem geplanten Soll-Zustand verglichen werden. Per se ist hierfür keine spezielle Kameratechnik erforderlich. Einzig werden Ansprüche an die Aufnahmequalität gerichtet – hierfür empfiehlt sich insofern ein Bildstabilisator. (Vgl. Hofstadler, 2019, S. 812 f.) Tuttas stellt verschiedene Aufnahmestrategien mittels hand-, kran- und flugzeuggetragener (meist per Drohne) Kamera gegenüber. Hieraus ergibt sich, dass keine Erfassungsart präferiert werden kann. Allerdings ist es notwendig, die örtlichen Baustellenbedingungen zu überprüfen und entsprechende Mittel zu verwenden. (Vgl. Tuttas, 2017, S. 34) Die Luftbildphotogrammetrie stellt nach Noack eines der grundlegenden Verfahren bei der Aufnahme von Trassen mit Längs- und Querprofilen dar.

(Vgl. Noack, 2019, S. 168) Zusätzliche Informationen wie GPS-(Global Positioning System) Koordinaten, Lichtverhältnisse oder Witterungsbedingungen werden ebenso gesammelt. Für die Rekonstruktion erfolgen die Aufnahmen überlappend und aus verschiedenen Blickwinkeln. (Vgl. Hofstadler, 2019, S. 822) Für Informationen zum weiteren Einsatz der Photogrammetrie im Baubetrieb gibt Hofstadler einen umfassenden Überblick. (Vgl. Hofstadler, 2019, S. 811 ff.)

Für die Erzeugung von 3D-Punktwolken wird üblicherweise in der UAV-basierten Photogrammetrie das Verfahren *Structure from Motion (SfM)* angewandt, welches den interaktiven Mehrbildauswertesystemen zuzuordnen ist. (Vgl. Chen et al., 2019, S. 11) Diese verfolgen das Ziel der Ableitung von räumlichen Objektinformationen. (Vgl. Luhmann, 2018b, S. 537) Weitere analytische Verfahren zur Berechnung von Orientierungsparametern der Bilder und zur Bestimmung von Objektinformationen aus gemessenen Bildkoordinaten sind die Einzelbildauswertung und die stereoskopische Auswertung. In der UAV-Photogrammetrie sind diese nicht von Relevanz und werden hier deshalb auch nicht behandelt. Ausführliche Informationen bez. dieser Verfahren können Luhmann entnommen werden. (Vgl. Luhmann, 2018b, S. 269 ff.)

Mit der Erzeugung einer dichten Punktwolke wird für jedes Bildpixel ein 3D-Punkt bestimmt. SfM beschreibt ein Verfahren, welches durch die Kombination von Bildverarbeitungsverfahren, robusten Orientierungsmethoden, Bündelausgleichung mit Simultankalibrierung, Stereobildmessung und Punktwolkenverarbeitung ein Objekt dreidimensional rekonstruiert. Der Maßstabsfaktor wird im Allgemeinen durch Passpunkte im Koordinatensystem bestimmt. Als SfM-System wird eine bestimmte Implementierung von Arbeitsschritten bezeichnet, welche Luhmann und Tuttas detailliert wiedergeben.

1. Automatische Merkmalsdetektion hinsichtlich der Merkmale, die sich für die automatische Bildzuordnung (Matching) eignen;
2. Merkmalszuordnung über Abstandsminimierung hochdimensionaler Merkmalsvektoren (bspw. SIFT);
3. Relative Orientierung benachbarter Bilder und sukzessive Bildung eines Gesamtmodells sowie Eliminierung von Ausreißern;
4. Ermittlung der endgültigen Parameter der inneren und äußeren Orientierung mittels Bündelausgleichung sowie der 3D-Koordinaten der gemessenen Merkmalspunkte (dünne Punktwolke);
5. Stereobildzuordnung und Durchführung des Stereomatchings zur Erzeugung einer dichten Punktwolke;
6. Filtern und Segmentieren der Punktwolke;
7. Aus den diversen Stereopaaren ermittelte Punktwolken (Multi-View Stereo) werden zu einem gesamthaften Oberflächenmodell fusioniert – Dreiecksvermaschung der Punktwolke;
8. Texture Mapping vom Oberflächenmodell;
9. Ableiten von Orthophotos oder Bildmosaiken aus den orientierten Bildern.

(Vgl. Luhmann, 2018a, S. 35; Luhmann, 2018b, S. 491 f.; Tuttas, 2017, S. 13 ff.)

SfM nutzt Bilder aus mind. zwei verschiedenen Sichtpunkten. Mit dem Erkennen von Schlüsselpunkten werden die geometrischen Beziehungen zwischen den Bildern berechnet und für die Triangulation verwendet. (Vgl. Chen et al., 2019, S. 11) Zu der Umsetzung des SfM-Verfahrens existiert eine Vielzahl an Arbeiten, weshalb in der vorliegenden Arbeit keine

vollständige Übersicht darüber erfolgt. Pollefeys et al. beschreiben in ihrer Arbeit diverse Vorgehensweisen, während Koutsoudis et al. eine Übersicht verfügbarer Systeme aus Sicht des Anwenders geben. (Vgl. Pollefeys et al., 2004, S. 208 ff.; Koutsoudis et al., 2015, S. 3 ff.) Einen umfassenden Überblick zur Leistungsfähigkeit des SfM-Verfahrens ist in Remondino et al. zu finden. (Vgl. Remondino et al., 2012, S. 42 ff.) Die am weitesten verbreitete Methode zur Merkmalserkennung per SIFT-Operator ist Lowe zu entnehmen. (Vgl. Lowe, 2004, S. 91 ff.) Die sukzessive Bildung eines Gesamtmodells und die 3D-Rekonstruktion ist ausführlich in Tuttas und Urban et al. beschrieben. (Vgl. Tuttas, 2017, S. 15 f.; Urban et al., 2016, S. 132 ff.) Die Rekonstruktion einer dichten Punktwolke ist ebenfalls mannigfaltig in der Literatur beschrieben. Einen weitreichenden Überblick dazu und über das Vorgehen lässt sich ebenso Tuttas entnehmen (Vgl. Tuttas, 2017, S. 17). Zum implizierten Stereomatching lässt sich das populärste Verfahren dem semi-globalen Matching auf der Basis von Hirschmüller zuordnen (Vgl. Hirschmüller, 2005, S. 808 ff.). Die Weiterentwicklung dieses Verfahrens bildet das objektraumbasierte semi-globale Mehrbildmatching. Aus diesem entstehen unmittelbar ein 3D-Volumenmodell sowie daraus abgeleitete Orthophotos, indem die Kostenfunktion im Objektraum formuliert und als Voxelraum organisiert wird. Es erlaubt die Einbeziehung sämtlicher Bilder simultan und somit also ein echtes Mehrbildmatching. (Vgl. Bethmann und Luhmann, 2017, S. 350 ff.)

Tuttas gibt einen Einblick über Studien zur Baufortschrittskontrolle mittels Photogrammetrie und Bildverarbeitung sowie zu diversen Aufnahmestrategien. (Vgl. Tuttas, 2017, S. 27 ff.) Es wird die photogrammetrische Erfassung von Baustellen untersucht, mit dem Ziel eines Soll-Ist-Vergleiches zum 4D-Modell. Die aufgezeigten Testszzenarien beschränken sich jedoch auf den Rohbauprozess von Hochbauprojekten. (Vgl. Tuttas, 2017, S. 4) Eine Studie von Omar et al. stellt einen automatisierten Soll-Ist-Vergleich mittels Photogrammetrie und BIM in den Mittelpunkt. (Vgl. Omar et al., 2018)

Die Vielzahl der Benannten sowie weitere Veröffentlichungen spiegeln die Aktualität des Themas und zeigen, dass aufgrund der diversen Prozesse im Baugeschehen und der ständig wechselnden Produktionsbedingungen (Leimböck et al., 2015, S. 7) noch weiteres Forschungspotenzial besteht.

### **2.3.3 Identifizierung anhand von Ortung**

#### Globale Ortung

Globale Navigationssatellitensysteme (GNSS), ist ein Sammelbegriff für die gemeinsame Nutzung der landesspezifischen Systeme (GPS + Glonass + Galileo + Beidou). Neben dem US-amerikanischen GPS sind das russische Glonass, das europäische Galileo und das chinesische Beidou nur einige von mehreren Systemen, die allein oder in Kombination mit anderen Navigationssatellitensystemen zur exakten Vermessung oder Objektortung auf der Erdoberfläche genutzt werden können. (Vgl. Bauer, 2018, Vf.) Über die Streckenberechnung zwischen Empfänger und Satellit erfolgt die Ortsbestimmung. Dem Empfänger wird mittels Satellitensignal die Satellitenposition übermittelt. Bei globalen Navigationssatellitensystemen ist das Grundprinzip die Bestimmung von Position, Geschwindigkeit und Zeit mittels Satellitensignal und Empfänger.

Eine höhere Genauigkeit erreicht die differenzielle Ortung in der Positionsbestimmung. Sie benötigt zwei Satellitenempfänger: den Referenzempfänger, dessen Position bekannt ist und laufend neu bestimmt wird, und den zweiten Empfänger, den Rover. Im Ergebnis der Korrekturdaten des Referenzempfängers verbessert der Rover seine Koordinatenbestimmung. Hiermit wird eine Genauigkeit im Zentimeterbereich erreicht. (Vgl. Bauer, 2018, S. 67 ff.)

Im Bauwesen werden GNSS-Systeme unter anderem zur Vermessung von Bauwerken und Objekten eingesetzt sowie zur Steuerung von Baumaschinen. Oft werden sogenannte Rovereinheiten für Vermessungsaufgaben verwendet. Eine an einem Lotstock befestigte GNSS-Antenne kann nach dem Prinzip der differenziellen Ortung zentimetergenau die Position der Stockspitze ermitteln. Zur Steuerung wird ein Feldrechner eingesetzt. So können Messpunkte mit wenig Aufwand festgehalten oder überprüft werden. Es können anhand der aufgenommenen Messpunkte dreidimensionale Modelle erstellt und bspw. Erdmassen durch Vorher-Nachher-Aufnahmen erfasst werden. (Vgl. Leica Geosystems AG, 2016)

Omar und Nehdi verweisen darauf, dass die Nutzung von GNSS-Systemen weit verbreitet Anwendung in der Lokalisierung und Navigation von Baumaßnahmen findet. Eine Bauteilverfolgung kann über den gesamten Lebenszyklus gewährleistet werden. Einschränkungen stellen die Blockierung, Ablenkung sowie Verzerrung von Satellitensignalen dar. In diesem Fall können keine genauen Positionsinformationen geliefert werden. Des Weiteren ist für die Anwendung ein klares Konzept notwendig, welches den Einsatz genau plant, da nur ein Empfänger je Bauteil unwirtschaftlich ist und dies hohe Kosten verursacht. (Vgl. Omar und Nehdi, 2016, S. 148) Zur Feststellung des Baufortschritts von linearen Infrastrukturprojekten stellen Behnam et al. ein Konzept mittels Satellitenfernerkundung dar. Mithilfe von Satellitenbildern wird der Baufortschritt grob geschätzt und visualisiert. Mit der Ablage von Baustellenfotos in Verbindung mit einem Geoinformationssystem (GIS) sollen 3D-Modelle erstellt und anschließend am BIM-Modell verglichen werden. (Vgl. Behnam et al., 2016, S. 114 ff.) Nachteilig ist der hohe manuelle Aufwand, um die erzeugten Satelliten- und Baustellenbilder mit geografischen Objekten zu verknüpfen. Ein automatisierter Prozess ist in den beschriebenen Studien nicht erwähnt. (Vgl. Omar et al., 2018, S. 174)

### Lokale Ortung

Für eine höhere Positionsgenauigkeit wird oft auf lokale statt globale Ortungssysteme zurückgegriffen. Der Vorteil gegenüber dem globalen Satellitensystem besteht im Einsatz im Innenbereich und bei der Signalabdeckung. Dagegen ist für einen Einsatz im Außenbereich einer linearen Infrastrukturmaßnahme ein erhöhter Organisationsaufwand notwendig. Die Erfassung von Ist-Daten zur Steuerung bauleistungsprozesse, welche Rückschlüsse auf den Baufortschritt geben, stellt Binder in den Mittelpunkt. (Vgl. Binder, 2014, S. 38) Binder zeigt diverse lokale Ortungssysteme, insbesondere Lösungen im Bereich aktiver RFID, UWB (Ultra Wideband), ZigBee und WLAN (Wireless LAN) mit den technischen Vor- und Nachteilen zum Einsatz in der Bauprozesssteuerung. Präferiert wird jedoch auch für punktuelle Bauwerke eine kombinierte Lösung beim Einsatz von lokalen Ortungssystemen mit der globalen Satellitenortung. (Vgl. Binder, 2014, S. 34 ff.)

## 2.4 Modell- und Prozessintegration

Mit dem Ziel der Arbeit (Abschnitt 1.3) und den im Kapitel 2 beschriebenen Grundlagen zum Controlling, der modellbasierten Projektabwicklung sowie der Erfassung des IST-Zustandes stellt sich ein komplexer Sachverhalt ein, der in einem Modell strukturiert aufgearbeitet werden soll. Hierfür ist es erforderlich, notwendig inhaltliche Aspekte des Modells in einem Prozess festzuhalten, der die Systematik und das Vorgehen im Modell aufzeigt.

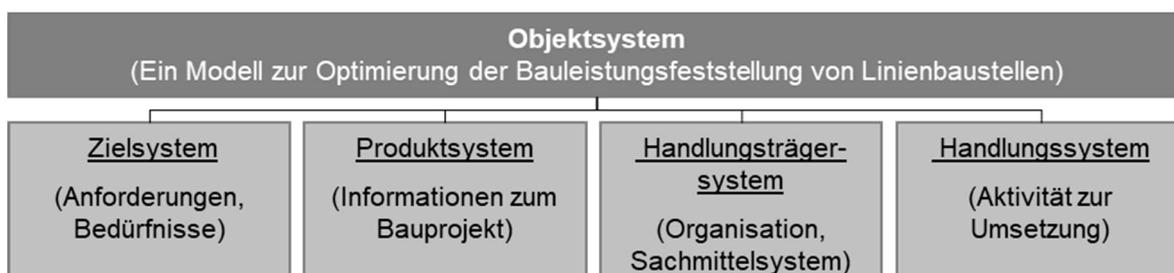
### 2.4.1 Modellentwicklung

Kochendörfer propagiert den sogenannten *systemischen Ansatz* zur Lösung komplexer Sachverhalte im Bauwesen. Darunter wird eine Vielzahl von Problemstellungen und deren Verbindung zueinander und zu umliegenden Aspekten im Ansatz der Systemtheorie abgebildet.

Die Sachverhalte werden als Systeme beschrieben und als Modell dargestellt. Mit dem Ziel umfängliche Probleme zu verstehen, entstehen abstrakte Systeme, die sich problemorientiert auf einen konkreten Sachverhalt bzw. Lösungsansatz beziehen. (Vgl. Kochendörfer et al., 2018, S. 13 ff.) Für die Beschreibung der Systemtheorie liegt eine Vielzahl von Betrachtungsperspektiven vor. Ein umfassender Überblick kann der Arbeit von Fauth entnommen werden. (Vgl. Fauth, 2021, S. 27 ff.)

Der Aufbau von Systemen besteht aus Elementen (Entitäten oder Objekte), dazwischenliegenden Beziehungen (Relationen) und Attributen. Einzelne Elemente weisen Eigenschaften auf, die durch qualitative und/oder quantitative Parameter durch Attribute beschrieben werden. (Vgl. Schneeweiß, 1991, S. 18) Die Beziehungen geben dem System eine Ordnung. Als Struktur wird die Summe aller Elemente und Beziehungen bezeichnet. Ein System kann aus mehreren Systemen bestehen, welche in Subsysteme gegliedert werden. Eine Untergliederung in mehrere Stufen ist möglich. Elemente und Beziehungen außerhalb eines Systems werden als Umwelt bezeichnet und können diverse Einflüsse auf das System haben. (Vgl. Kochendörfer et al., 2018, S. 13 f.)

Systeme lassen sich nach Kochendörfer und Patzak im Hinblick auf Problemlösungen in vier Systemtypologien unterscheiden, nämlich das Zielsystem, das Handlungssystem, das Handlungsträgersystem und das Produktsystem. (Vgl. Kochendörfer et al., 2018, S. 17; Patzak, 1982, S. 30 f.) Heraus zu stellen ist, dass hierbei Ziel-, Produkt- und Handlungsträgersystem einer Aufbauorganisation zugrunde liegen, während das Handlungssystem einem Ablaufsystem folgt. (Vgl. Kochendörfer et al., 2018, S. 13 ff.)



**Abbildung 14: Schematischer Aufbau eines Systems**

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Kochendörfer et al., 2018, S. 18

Da es nicht möglich ist alle Aspekte in einem Modell originalgetreu zu erfassen, werden Modelle abstrahiert. (Vgl. Schneeweiß, 1991, S. 53) Sie bilden die Realität vereinfacht ab und folgen dem Prinzip der Abstraktion. (Vgl. Gadatsch, 2017, S. 79) Es entsteht ein abstraktes System, das sich problemorientiert auf einen konkreten Lösungsansatz bezieht. (Vgl. Kochendörfer et al., 2018, S. 13 ff.)

#### **2.4.2 Prozessdarstellung**

Die Darstellung der Prozesse (die Prozessmodellierung) dient der Beschreibung komplexer Aufgaben des Prozesses bzw. Teilprozesses. (Vgl. König, 2021, S. 74 f.) Es gibt eine Reihe von unterschiedlichen Prozessdarstellungsmethoden, welche Gadatsch im Detail beschreibt. In der vorliegenden Entwicklung findet die kontrollflussorientierte Methode *Business Process and Model Notation* (BPMN) Anwendung. (Vgl. Sacks et al., 2018, S. 99; Gadatsch, 2017, S. 81 ff.)

Aufgrund der besonders geeigneten Darstellung von komplexen Strukturen sowie der vermehrten Anwendung der BPMN-Notation im Bereich der BIM-Methodik wird diese bevorzugt. (Vgl. Sacks et al., 2018, S. 99; König, 2021, S. 63) Es kann auf Basis des Normungsstandards ISO/IEC 19510 eine Einheitlichkeit bei der Anwendung sowie beim Verständnis erreicht werden. Ziel dieser Notation ist die Nachvollziehbarkeit und Transparenz der Prozesse für optimale Koordination und einen störungsfreien Daten- und Informationsaustausch. (Vgl. König, 2021, S. 72).

Die diversen Elemente der BPMN sind der ISO/IEC 19510:2013-07, 2013, S. 25 ff. zu entnehmen.

### **2.5 Schlussfolgerung und Bewertung**

Für eine erfolgreiche Projektrealisierung ist ein funktionierendes Baustellencontrolling unerlässlich. Zeitgleich wird die aktuelle Praxis der Ergebnisrechnung als aufwendig und fehleranfällig charakterisiert. Es fehlt an Standardisierungen und an einem homogenen Vorgehen. Die Prozesse greifen nicht ineinander und stellen jeweils einzelne Aufgabenbereiche dar, womit eine grundlegende Auswertung erschwert wird – denn bereits in der Erfassung von Daten werden unterschiedliche Wege verfolgt. Entweder werden Rechnungsmengen herangezogen, welche per se nicht gleich den Leistungsmengen sein müssen, oder sie werden gänzlich geschätzt.

Die Erfassung der tatsächlichen Ist-Daten ist die Basis für ein erfolgreiches Controlling. Deren Erfassung unter Einsatz digitaler Anwendungen wird zukünftig eine große Rolle in Bauunternehmen spielen. Dies im Zusammenwirken mit der BIM-Methodik als Ausgangsbasis stellt einen erhöhten Forschungsanteil dar. Zwar gibt es vereinzelt Lösungen zur Erfassung von Ist-Daten; jedoch können diese als Insellösungen beschrieben werden und es fehlt an der Verwertung bzw. Auswertung dieser im Zusammenhang der anzuwendenden BIM-Methodik. Die Interoperabilität in diesem Bereich zeigt einen erhöhten Forschungsbedarf. Dies erfordert eine prozessuale aber gleichermaßen auch eine zielorientierte Auseinandersetzung. Die Einbeziehung organisatorischer Abläufe darf dabei nicht vernachlässigt werden.

Die Recherche hat gezeigt, dass in den letzten Jahren eine hohe Dynamik in der technologischen Weiterentwicklung unterschiedlicher Erfassungsmethoden, vor allem in der

Baufortschrittsüberwachung, verzeichnet werden konnte. Letztlich kann festgehalten werden, dass es dennoch kein System gibt, das eine vollautomatische Überwachung und Analyse gewährleistet. Gegen solch eine Gesamtautomatisierung stehen außerdem die Individualität jedes Bauvorhabens sowie die hohe Anzahl an unterschiedlichen zu erfassenden Daten. Eine Einzelfallbeurteilung, welche Technologie sich zur Erfassung welcher Daten eignet, muss branchenspezifisch aufgrund vorherrschender Rahmenbedingungen vorgenommen und projektspezifisch geprüft und ggf. angepasst werden. In der Baufortschrittserkennung von Hochbauten gibt es eine Reihe von Untersuchungen zur automatisierten Objekt- und Bauteilidentifikation. Keine dieser Untersuchungen betrachtet dies jedoch im Kontext des Baustellencontrollings, dessen prozessuales Vorgehen und die erforderlichen Daten im Gesamtsystem der Bauleistungsfeststellung. Auffallend ist hierbei die unausgeglichene Analyse zwischen Hochbau- und Tiefbaubereichen. Während einige Ansätze im Hochbau verfolgt und favorisiert werden, ist im Straßen- und Tiefbaubereich kaum ein verwertbarer Ansatz gegeben.

Um dennoch eine Optimierung des Prozesses der Bauleistungsfeststellung für Straßenbauprojekte herbeizuführen, ist die Identifikation des Baufortschrittes des jeweiligen Bauteils und die weitere Auswertung und Verwendung von Metadaten im Sinne der Interoperabilität unabdingbar. Die größte Herausforderung stellen dabei die spezifischen Besonderheiten des Straßenbaus dar, und zwar die räumliche horizontale Ausdehnung der einzelnen Bauteile.

## 3 Empirische Studie

### 3.1 Forschungsdesign und Datenerhebung

Die in Kapitel 2 durchgeführte Literaturrecherche ergab keinen adäquaten Datenstand für die Entwicklung eines Modells zur Optimierung der Bauleistungsfeststellung für Linienbaustellen. Aufgrund dessen erfolgte aufbauend eine empirische Untersuchung im Kontext des zentralen Themas. Zum besseren Verständnis wird auf diese in den folgenden Abschnitten kurz eingegangen.

Für die Beantwortung der Forschungsleitfrage, wie ein Konzept zur automatisierten Leistungsfeststellung in die Prozesse des Baustellencontrollings integriert werden kann (F1.1, S. 18) sowie welche Rahmenbedingungen des deutschen Bauwesens bei der Gestaltung eines Konzeptes zur automatisierten Leistungsfeststellung zu berücksichtigen sind (F1.2, S. 18), wurde als Untersuchungsdesign das qualitative Experteninterview gewählt. (Abschnitt 1.5)

In der empirischen Sozialforschung werden quantitative und qualitative Forschungsmethoden unterschieden. Diese weisen unterschiedliche Strategien zur kausalen Erklärung in Abhängigkeit des Gegenstands der Fragestellung und der jeweiligen Forschung auf. Die Darstellung empirischer Sachverhalte in Zahlen, um diese mathematisch bzw. statistisch zu verarbeiten, entspricht quantitativen Methoden. Hierfür sind Operationalisierungen und Quantifizierungen notwendig. Quantitative Forschung erfolgt meist in Form von Experimenten und Umfragen. Um Hypothesen mithilfe des deduktiven Vorgehens zu testen, werden allgemeingültige und repräsentative Ergebnisse erzeugt. (Vgl. Hug und Poscheschnik, 2015, S. 86 ff.)

Interesse in der Subjektivität des Beforschten, um Kausalmechanismen zwischen Ursache und Wirkung zu verdeutlichen und ihren Geltungsbereich zu bestimmen, entspricht der qualitativen Forschung. Kennzeichnend ist ein induktives Vorgehen, welches durch die detaillierte Analyse eines oder weniger Fälle erfolgt. Sachverhalte werden interpretiert und verbal beschrieben, um Informationen über den Sachverhalt hinaus zu standardisieren. Die qualitative und quantitative Forschung unterscheiden sich in den Methoden der Vorgehensweise zu kausalen Erklärungen zu gelangen. (Vgl. Pieper, 2019, S. 34 ff.; Gläser und Laudel, 2010, S. 27 f.)

Die Entscheidung, ob das erforderliche Datenmaterial quantitativ oder qualitativ erhoben wird, liegt in der vorliegenden, sehr komplexen Thematik begründet. Es bedarf spezieller Vorkenntnisse der befragten Personen für die Gewinnung brauchbarer Daten. Im Zuge einer quantitativen Datenerhebung müssten diese Vorkenntnisse vorab, durch eine Zusammenstellung diverser Informationen und Lektüre, aufwendig an den Befragten übermittelt werden. Der Befragte müsste einen hohen zeitlichen Einsatz im Vorfeld der Befragung aufwenden. Dies hätte zur sicheren Folge, dass die grundsätzliche Bereitschaft zur Teilnahme an der Befragung abnimmt. Des Weiteren besteht die Gefahr, dass gestellte Fragen aufgrund eines unterschiedlichen Anwenderhorizontes seitens der Befragten nicht homogen beantwortet werden würden und die erhobenen Daten das Ergebnis verzerren. Folglich wird die qualitative Forschungsmethode Anwendung finden, um die benannten Unsicherheiten weitestgehend zu vermeiden. Darüber hinaus liegt das Erkenntnisinteresse in den Kausalzusammenhängen, dem Aufzeigen von Ursache und Wirkung, anstatt in einer reinen Identifizierung von Zusammenhängen. Die qualitative Forschungsmethode ist vor allem

geeignet, um nominalskalierte und multidimensionale Variablenetzwerke zu erfassen. Wirkungszusammenhänge lassen sich selten auf einige oder wenige metrische Einflussgrößen reduzieren. Qualitative Forschungsmethoden finden daher häufig bei betriebswirtschaftlichen Untersuchungen mit komplexen Abhängigkeiten sowie Zusammenhängen Anwendung. (Vgl. Hussy et al., 2013, S. 186 ff.; Wrona, 2005, S. 10 f.)

### **3.1.1 Fragestellung**

„Wie erfolgt die Leistungsfeststellung und -darstellung in ausführenden Straßen- und Tiefbauunternehmen und welche digitalen Methoden werden hierfür bereits verfolgt und angewandt?“

Aus den theoretischen Vorüberlegungen wird als resultierende, zu schließende Wissenslücke die Forschungsfrage benannt. (Vgl. Gläser und Laudel, 2010, S. 62 f.) Aus der Fachliteratur ergab sich, dass kein allgemeingültiger und standardisierter Prozess für den Ablauf der Bauleistungsfeststellung und Leistungsmeldung existiert. Mittels der empirischen Studie und deren ausgewerteten Anforderungen soll ein Prozessmodell zur Bauleistungsfeststellung entwickelt werden. Der Einsatz digitaler Erfassungsmethoden im Zusammenhang der BIM-Methodik soll entsprechend berücksichtigt werden. Aktuelle Angaben, in welchem Umfang und in welchen Bereichen diese in der Praxis konkret für die Bauleistungsfeststellung und die Leistungsmeldung im Straßen- und Tiefbau eingesetzt wird oder aus welchen Gründen bisher kein Einsatz erfolgte, können aus dem aktuellen Stand der Forschung nicht entnommen werden. (Abschnitt 2.2 und 2.3).

Zur Ermittlung der für die Erstellung des Prozesses benötigten Informationen wurden nachfolgende Fragestellungen bestimmt und die Forschungsfrage konkretisiert. Sie wurden deduktiv aus den allgemein theoretischen Überlegungen dieser Arbeit entwickelt und in Interviewfragen übersetzt. Dies ermöglichte ein strukturiertes Vorgehen im Sinne der qualitativen Forschung. (Vgl. Hug und Poscheschnik, 2015, S. 56; Gläser und Laudel, 2010, S. 90 ff.)

1. Mit welchen Methoden erfolgt die Leistungserfassung einer Baustelle in Straßen- und Tiefbauunternehmen?
2. Wie erfolgt die Leistungsdarstellung der Baustellen in Straßen- und Tiefbauunternehmen?
3. Wie ist der Status quo von BIM und digitalen Erfassungsmethoden im Zuge der Bauleistungsfeststellung und Leistungsmeldung?
4. Über welche Kenntnisse verfügen Mitarbeiter bei der BIM-Methodik und digitalen Erfassungsmethoden; welche werden aktuell eingesetzt?
5. Worin werden Verbesserungsansätze oder -potenziale bei der Leistungsfeststellung und Leistungsmeldung gesehen; wo liegen die Grenzen?
6. Wie ist die zukünftige Entwicklung der Digitalisierung der Bauleistungsfeststellung und Leistungsmeldung zu bewerten; welche Anforderungen bestehen?

### 3.1.2 Erhebung

Grundgesamtheit der Untersuchung stellen alle nationalen Straßen- und Tiefbauunternehmen dar. Um sowohl den in der Forschung geforderten Effizienzansprüchen gerecht zu werden als auch Wirkungszusammenhänge oder Einflussfaktoren auf die Ergebnisse zu ermitteln, werden sogenannte Experteninterviews (teilstandardisiertes Interview) als wissenschaftlich adäquate Methode angewandt. (Vgl. Leitner und Wroblewski, 2005, S. 255) Auf Grund der Vielzahl von Elementen wurde eine Stichprobe aus der Grundgesamtheit ermittelt. Eine Erhebung aller Elemente ist in der Regel weder möglich noch umsetzbar. Die Datengewinnung kann sich demnach ausschließlich auf eine Auswahl von repräsentativen Informationsquellen beschränken. (Vgl. Mayer, 2013, S. 38) Für die Durchführung einer qualitativen Untersuchung gibt es keine allgemeingültige Stichprobengröße. Die theoretische Verallgemeinerung kann bereits mit wenigen Fällen realisiert werden. In der wissenschaftlichen Literatur variiert die Stichprobengröße zwischen fünf und 60 Fällen. Nachweislich konnten bereits mit sechs Interviews Themen eines Untersuchungsgegenstandes erarbeitet werden. (Vgl. Akremi, 2019, S. 325 ff.)

Insgesamt wurden in der vorliegenden Arbeit  $n = 36$  Personen mit einer Gesamt-Audioaufzeichnungsdauer von ca. 18 h 45 min befragt. Von diesen flossen die Interviews von 32 Personen mit nachweislichem Expertenwissen in die Hauptstudie und Auswertung ein (Anlage 1 – Dateninventar Interviews).

Strategie und Stichproben sollen nach Patton (2002) zielgerichtet ausgewählt werden. Insofern wurden für die vorliegende Studie typische Fälle genutzt, von denen angenommen wurde, dass sie das Untersuchungsfeld in besonderem Maße repräsentieren. Kausalzusammenhänge konnten so leichter aufgedeckt werden. Zu beachten ist jedoch, dass diese Informationen nicht generell zu Grunde liegen. Insofern muss eine sorgfältige Prüfung und Auswertung erfolgen. Vorkenntnisse zum Themengebiet oder das Hinzuziehen von Informanten sowie eine grundlegende Recherche sind von Nöten, um typische Fälle selektieren zu können. (Vgl. Patton, 2002, S. 236) All dies wurde im Vorfeld durchgeführt um, als typischen Fall, ein nationales Straßen- und Tiefbauunternehmen zu identifizieren. Es erfolgt dabei keine Eingrenzung auf dessen jeweilige Spezialisierung, Unternehmensgröße oder den Standort innerhalb Deutschlands und resultiert einzig aus dem Untersuchungsgegenstand der Studie.

Das Kriterium der Personenauswahl beruht maßgeblich auf den theoretischen Überlegungen zur Einordnung der Bauleistungsfeststellung und Leistungsmeldung innerhalb eines Bauunternehmens. Bei der Auswahl der befragten Personen wurde auf eine möglichst vielfältige Ausprägung der Merkmale, der hierarchischen Position, des inhaltlichen Arbeitsschwerpunktes und des zu bearbeitenden Fachbereichs Straßen- und Tiefbau geachtet. Bogner et al. unterteilen Expertenwissen in Persona nach spezialisierten Laien, Spezialisten, Experten und Eliten und grenzt diese in Bezug ihres Machtverhältnisses gegeneinander ab. Die Grenzen der benannten Unterteilung sind verschwommen, weshalb eine eindeutige Zuordnung nicht immer gegeben werden kann. (Vgl. Bogner et al., 2014, S. 13 ff.)

Ein Experte ist im Rahmen der Untersuchung als eine Person definiert, die aufgrund ihrer beruflichen Stellung über fachspezifisches Wissen und Können verfügt. Der Experte verfügt

auf seinem begrenzten Gebiet über ein klares und abrufbares Wissen. (Vgl. Miegl und Näf, 2005, S. 7; Gläser und Laudel, 2010, S. 13; Mayer, 2013, S. 41) Neben dem exklusiven Wissensbestand gehört auch seine verantwortliche Zuständigkeit für die Bereitstellung, Anwendung und Absicherung von Problemlösungen zu den besonderen Merkmalen. (Vgl. Pfadenhauer, 2005, S. 116)

Sämtliche befragte Personen verfügen über umfassende Erfahrung hinsichtlich der zu untersuchenden Thematik. Alle interviewten Personen lassen sich dem Expertenwissen zuordnen. So kann bspw. der befragte Bauleiter als spezialisierter Laie (fünf Interviews) verstanden werden, hingegen die Oberbauleiter und Projektleiter als Spezialisten sowie Personen, die ausschließlich den Controllingbereich abdecken (9 Interviews). Einem Experten ist aufgrund des Macht-Wissens-Verhältnisses eine leitende Funktion im Berufskontext zuzuordnen - und dem Entsprechen in der vorliegenden Studie Niederlassungs-, kaufmännischen sowie technischen Leitern der interviewten Personen (zehn Interviews). Den Geschäftsführern obliegt aufgrund des Macht-Wissens-Verhältnisses die Einordnung der Elite (acht Interviews). Eine Übersicht der befragten Personen sowie ihrer beruflichen Hintergründe ist Anlage 1 zu entnehmen.

In Vorbereitung auf die Befragung wurde ein Leitfragebogen (Anlage 2 – Leitfragebogen) erarbeitet. Dieser beinhaltet die zu behandelnden Fragen, welche jedoch situativ in ihrer Reihenfolge und mitunter Formulierung angepasst wurden. Aufgrund des halbstrukturierten Interviews konnte der Interviewte demnach offen und frei antworten, ohne eine Auswahl an vorgegebenen Antworten beachten zu müssen. Damit wird vermieden, dass durch starre Vorgaben des Interviewers die Meinung des Befragten beeinflusst oder verzerrt wird. Nach Mayring bezieht sich das Vorgehen der halbstrukturierten Befragung auf die Freiheitsgrade des Interviewers, wodurch weitergehende, problemorientierte Erkenntnisse gewonnen werden können, die bis dato nicht berücksichtigt werden konnten. (Vgl. Mayring, 2016, S. 66) Dem Interviewer bietet sich damit die Möglichkeit, den Befragten durch eine geschickte Gesprächsführung zunehmend auf das Problem zu zentrieren. (Vgl. Hanusrichter, S. 141)

Der Leitfragebogen sowie ein zusätzlich erarbeitetes Dokument, welches mit „Ausgangssituation für die empirische Studie“ (Anlage 3) betitelt wurde und den Forschungshintergrund beschreibt, wurden den zu Interviewenden vorab übermittelt. Dies ermöglicht den Personen einen ersten Einblick in die Thematik. Durch persönliche und/oder telefonische Vorgespräche mit potenziellen Personen, in denen die grundsätzliche Bereitschaft abgefragt wurde, kann somit eine sorgfältige, kontextbezogene Auswahl der Personen mit Expertenwissen bestätigt werden. Die Übermittlung des endgültigen – und für alle Befragten identischen – Leitfragebogens erfolgte nach einem erfolgreichen Pretest in der Vorstudie. Dieser dient der Findung der optimalen Frageformulierung sowie deren Aufbau. Dazu wurden wissenschaftliche Pseudointerviews geführt, um die Verständlichkeit und Flüssigkeit der formulierten Fragen zu überprüfen. (Vgl. Weichbold, 2019, S. 350; Meuser und Nagel, 2005, S. 77) Für den Pretest erfolgten ein Interview mit einem Experten auf dem Gebiet der empirischen Sozialforschung und drei weitere Interviews mit Personen mit nachweislichem Expertenwissen des vorgestellten themenbezogenen Kontexts. Dies trug zur fachlichen und empirischen Verbesserung des finalen Leitfragebogens bei. Der nachfolgenden Abbildung 15 kann der Gesamtprozess zur Durchführung der empirischen Studie entnommen werden.

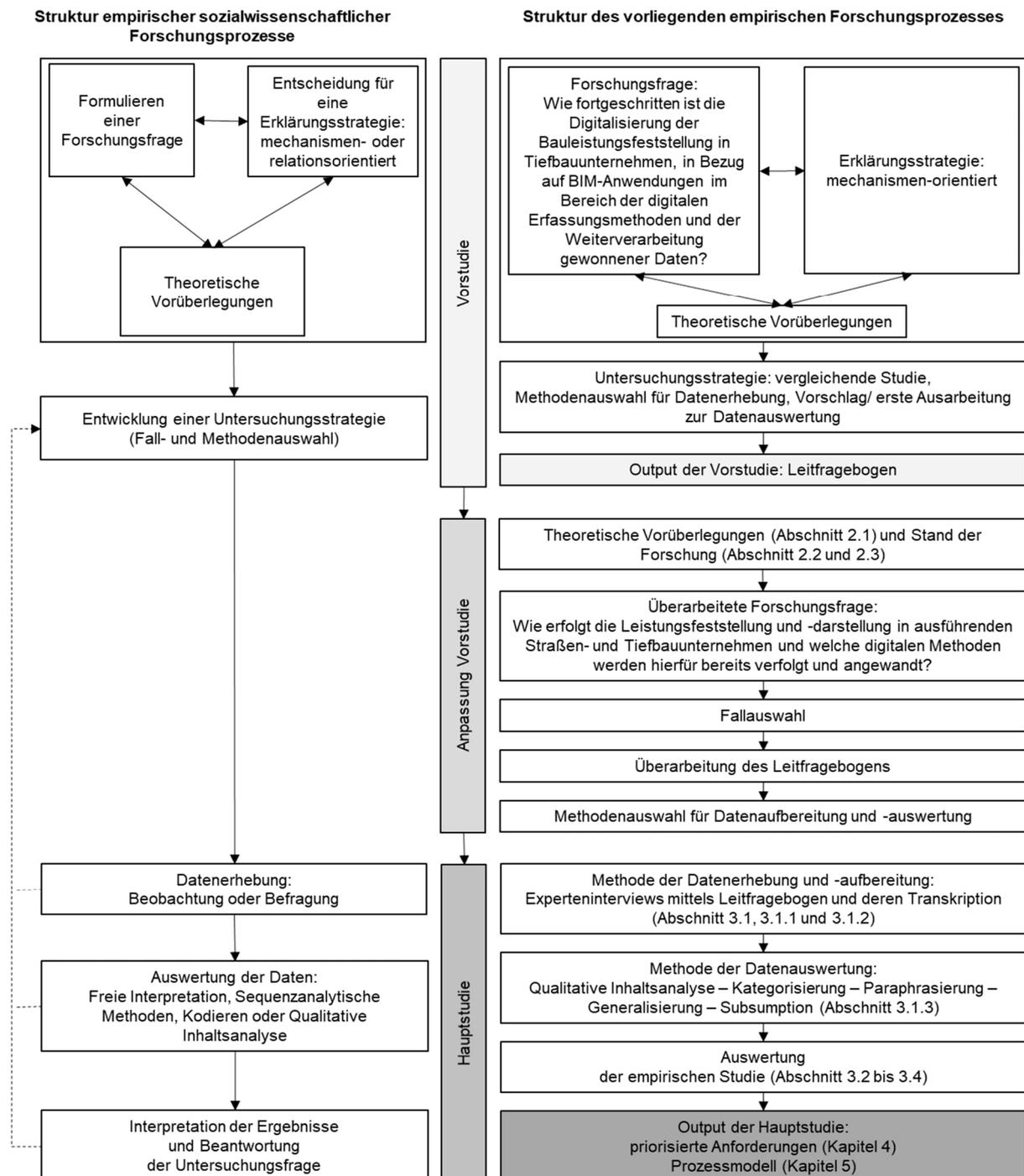


Abbildung 15: Forschungsprozess der empirischen Studie

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Pieper, 2019, S. 35; Gläser und Laudel, 2010, S. 35

### 3.1.3 Auswertung der Daten

Hinsichtlich des Gütekriteriums Objektivität und Diskussion der Limitation in der empirischen Forschung muss darauf verwiesen werden, dass eine vollständige Objektivität im Rahmen der Auswertung nicht möglich ist. Um die Ergebnisse nicht zu verfälschen, wurde eine intersubjektive Übereinstimmung angestrebt. (Vgl. Hug und Poscheschnik, 2015, S. 94) Ebenso ist zu beachten, dass das Endergebnis nicht als einheitliches Dogma gewertet werden kann. Differenzen können nur durch die Erhebung der Grundgesamtheit vollständig bereinigt werden. Die ausgewählte Auswahl wird als repräsentativ betrachtet. Die Ergebnisse gelten als „verobjektivierter“ Praxisstandpunkt und sie werden so als Komponente für die

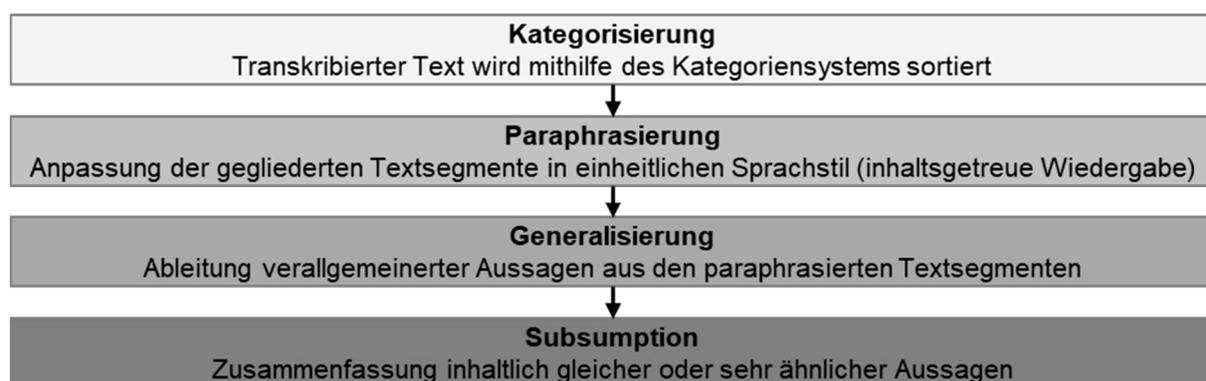
Lösungsfindung herangezogen. (Vgl. Hanusrichter, S. 141; Abels und Behrens, 2005, S. 175)

Die qualitative Inhaltsanalyse und Auswertung der Interviews erfolgten nach dem Verfahren von Mayring und Fenzl. (Vgl. Mayring und Fenzl, 2019, S. 633) Die systematische Auswertung qualitativer Datenerhebungen wird für die vorliegende Arbeit herangezogen. Für eine bessere Nachvollziehbarkeit wurden die Daten mit einem Tonbandgerät aufgezeichnet und anschließend transkribiert. Das Transkribieren ist für die Nachvollziehbarkeit und Transparenz der Forschung unerlässlich. Die transkribierten Interviews wurden mittels des Kategoriensystems in der Software MaxQDA für die anschließende Weiterverarbeitung sortiert und aufbereitet.

Iterativ in mehreren Schritten erfolgte die Entwicklung des Kategoriensystems. (Vgl. Mayring und Fenzl, 2019, S. 640) Zunächst wurde deduktiv ein theoriegeleitetes Kategoriensystem erarbeitet, welches zum einen auf den Erkenntnissen des Autors im Rahmen der durchgeführten Recherche und einer umfassenden Literaturerhebung sowie zum anderen auf dessen praktischer Erfahrung und den daraus resultierenden theoretischen Vorüberlegungen basierte. (Kapitel 2)

Anhand mehrmaliger Materialdurchläufe wurde das entwickelte Kategoriensystem sukzessive überarbeitet und weiterentwickelt. Das bedeutet, während der Interpretation der zu diesem Zeitpunkt vorliegenden Informationen erfolgte die Aufnahme neuer - oder die Veränderung bestehender Variablen - durch induktives Erstellen von Unterkategorien. Um dem Kriterium der Transparenz der empirischen Forschung gerecht zu werden, findet sich eine detaillierte Auflistung der Kategorien, Definitionen und Ankerbeispiele in Anlage 4 – Kodierungssystem Interviews.

Die Auswertung umfasst einen vierstufigen Prozess, der der nachfolgenden Abbildung 16 zu entnehmen ist.



**Abbildung 16: Vierstufige Auswertung**

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Mayring und Fenzl, 2019, S. 637 ff.

Anlage 5 der Auswertungstabelle sind die codierten Interviewsegmente inklusive Paraphrasierung, Generalisierung und Subsumption zu entnehmen. Die vollständig transkribierten Interviews bildeten deren Basis.

Ziel war die Erhebung der aktuellen Ausprägungen der Leistungsfeststellung und -darstellung im Arbeitskontext der befragten Personen. Die aus den Interviews gewonnenen Erkenntnisse dienen dazu, den Ist-Stand im untersuchten Kontext zu erfassen und somit eine Ausgangsbasis für die Konzeptionierung von Optimierungen zu schaffen. Aus den vier

formulierten Fragenblöcken des Leitfragebogens (Anlage 2) werden insgesamt drei inhaltliche Themenblöcke gebildet, welche in der nachfolgenden Abbildung 17 zusammenfassend dargestellt sind. Fragenblock I des Leitfragebogens bleibt unberücksichtigt. In diesem wurden allgemeine Daten erfasst, die den Interviewpartner im Sinne der in Abschnitt 3.1.2 beschriebenen Kriterien, als Person mit Expertenwissen des eingegrenzten Untersuchungsfeldes ausweist.

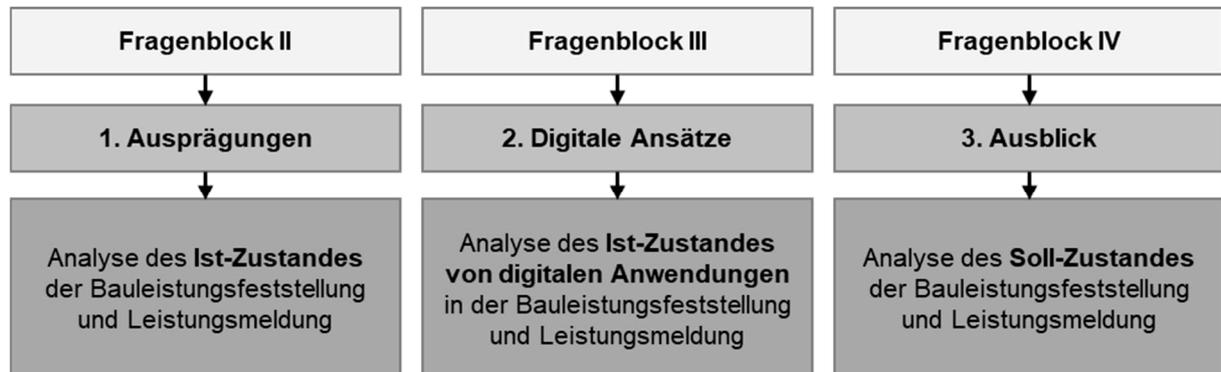


Abbildung 17: Inhaltliche Einordnung und Auswertung

### 3.2 Ausprägungen der Bauleistungsfeststellung und Leistungsmeldung

Um den ersten Teil der Forschungsfrage aus dieser Studie zu beantworten, wurde der erste Teil des Fragenblocks ausgewertet. Die Frage hat zum Ziel, einen Überblick über die aktuell eingesetzten Methoden der Leistungserfassung und -meldung in Straßen- und Tiefbauunternehmen zu erhalten. Dies dient zum einen als themenbezogener Einstieg und zum anderen soll es aufzeigen, auf welchen bestehenden Prozessen der Leistungserfassung und -meldung ein neues optimiertes Konzept aufsetzen kann.

Die Untersuchung bezog sich, nach der theoretischen Begriffsabgrenzung, zunächst auf die aktuellen Ausprägungen der Leistungserfassung, die als Voraussetzung der Leistungsmeldung zu betrachten ist. Dies dient dem Schließen von Wissenslücken im Prozessmodell. Eine konsequente Abgrenzung zwischen den beiden Begriffen Leistungserfassung und Leistungsmeldung wird von den Befragten nicht immer eingehalten. Aufgrund dessen kommt es in der Auswertung zu Überschneidungen, die allerdings wegen des Systemzusammenhangs und der bestehenden Kausalmechanismen für eine ganzheitliche Auswertung unerlässlich sind.

Abbildung 18 rekonstruiert die zugehörigen Fragenbereiche (FB), deren Kategorien (K) sowie Unterkategorien (UK).

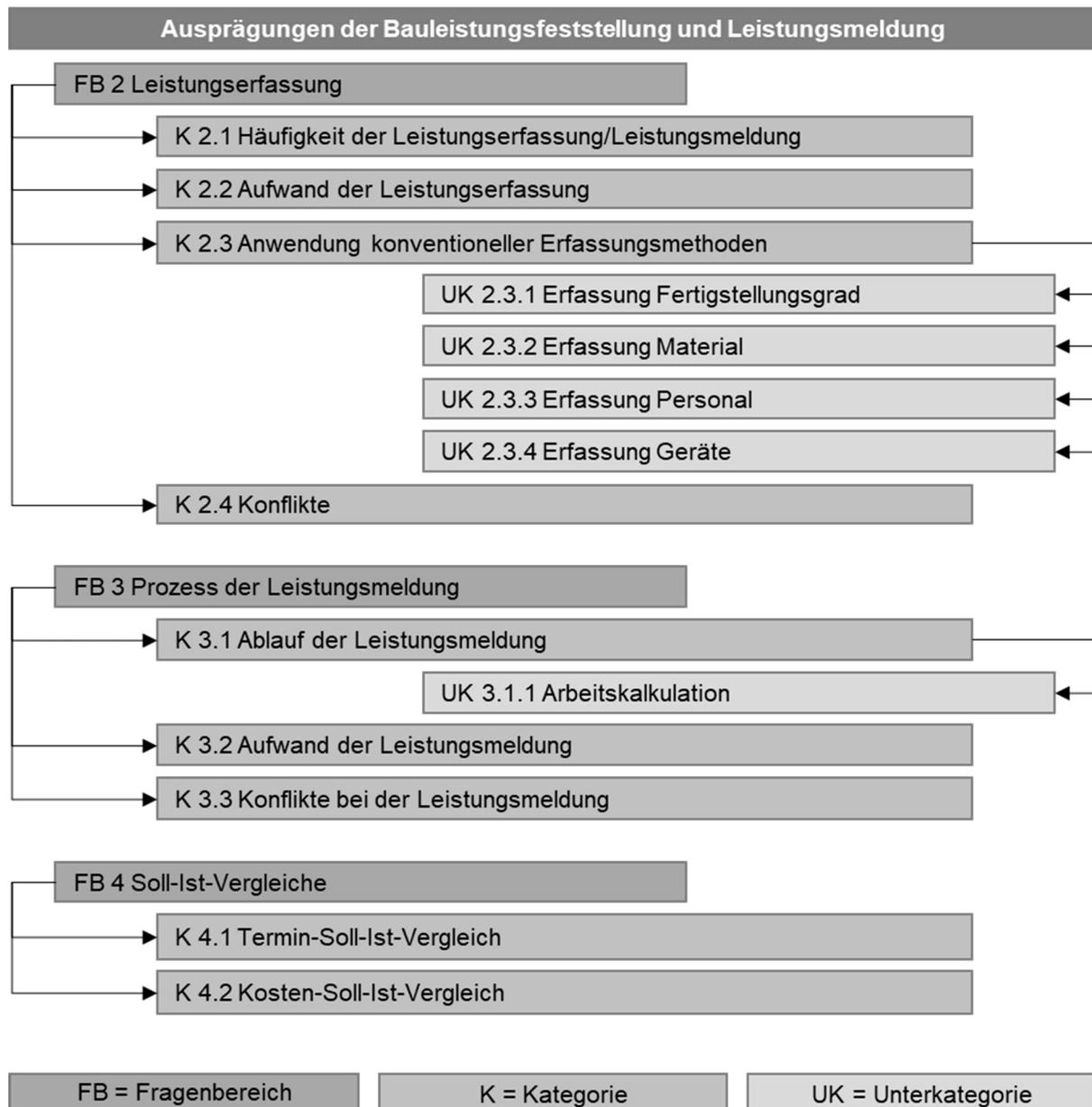


Abbildung 18: Aktuelle Ausprägung der Bauleistungsfeststellung und Leistungsmeldung

### 3.2.1 Leistungserfassung

Zunächst soll das derzeitige und konventionelle Vorgehen der Leistungserfassung betrachtet werden. Die Frage nach der Leistungserfassung hatte das Ziel, einen Überblick über die aktuell eingesetzten Methoden der Leistungserfassung zu erhalten sowie das prinzipielle Vorgehen zum Prozess zu erörtern. Unterteilt sind die Ergebnisse der Leistungserfassung in Häufigkeit, Aufwand, Anwendung konventioneller Erfassungsmethoden sowie bestehende Konflikte. (Abbildung 19)

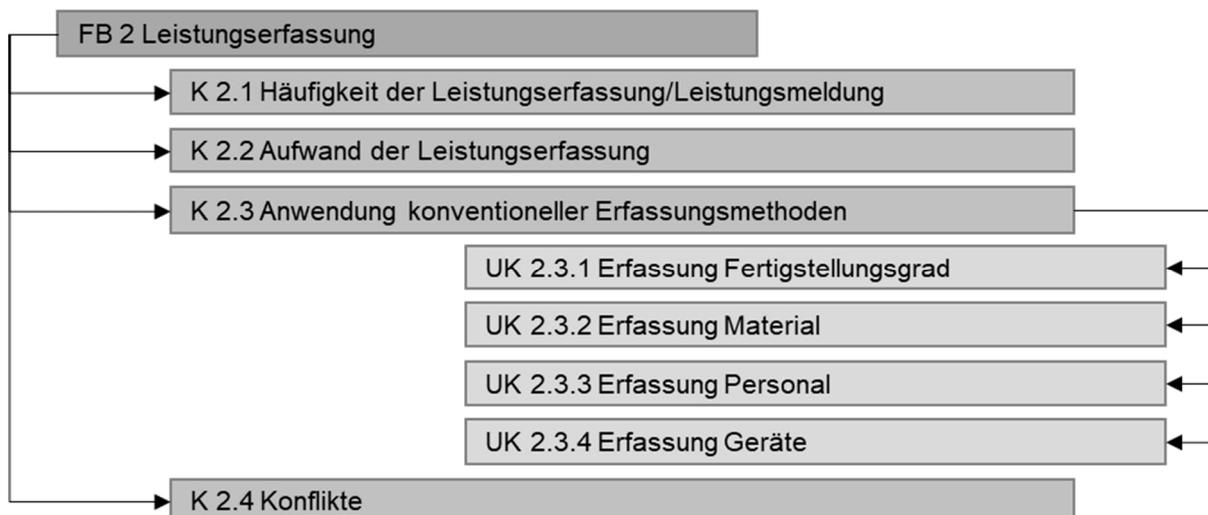


Abbildung 19: FB 2 Leistungserfassung

### Häufigkeit der Leistungserfassung/Leistungsmeldung

Aufgrund des Systemzusammenhangs von Leistungserfassung und Leistungsmeldung und der übereinstimmenden Beantwortung der Interviewten wird die Häufigkeit der Durchführung gemeinsam identifiziert.

Es ist festzuhalten, dass die Leistungserfassung einmal im Monat stattfindet, ebenso wie die Leistungsmeldung, welche zu einem definierten Stichtag anzufertigen und einer übergeordneten Organisation (Controlling, Geschäftsführung etc.) zuzuführen ist. Der definierte Stichtag liegt meist auf dem Monatsende oder am Beginn des Folgemonats. Vereinzelt wird auf eine vierzehntägige und wöchentliche Leistungserfassung verwiesen sowie auf eine tägliche Erfassung der Leistung bei großen Umsätzen. Herauszustellen ist jedoch, dass in diesem Zusammenhang nur von der Leistungserfassung gesprochen wird und nicht von der Auswertung, welche mit der Leistungsmeldung einhergeht und diese somit weiterhin einer monatlichen Erstellung zugesprochen werden kann. Vermehrt ist zu hören, dass die Leistungsmeldung, als Auswertung der Leistungserfassung, oft zu einem späteren Zeitpunkt stattfindet, sofern alle Daten (Rechnungen, Kosten etc.) eingegangen sind. Es wurde von Zeiträumen bis zu einem Monat nach der eigentlichen Leistungserfassung gesprochen, was bedeutsam ist.

Kürzere Perioden der Leistungserfassung und Leistungsmeldung werden ausdrücklich zur effektiveren Gegensteuermaßnahme bei Fehlentwicklungen eingesetzt.

### Aufwand der Leistungserfassung

Aus den Interviews ergibt sich, dass die Leistungserfassung ein permanenter Prozess ist, um die Ist-Situation der Baustelle nachvollziehen zu können. Aussagen bezüglich des Zeitaufwandes dieses Prozesses gestalten sich unterschiedlich und sind abhängig von den internen Strukturen der einzelnen Unternehmen sowie der Baumaßnahmen an sich.

Der Prozess wird als permanent und sehr zeitaufwendig beschrieben und wird so für den Bauleiter oft zur Hauptaufgabe. Hinzu kommt, dass der Prozess aufgrund des zeitintensiven Vorgangs oft als störend empfunden und daher ungern von den Beteiligten ausgeführt wird. Sofern die Befragten sich zum zeitlichen Umfang des Prozesses äußerten, war die Rede von einem Abrechner (als Person), welcher jeden Tag damit beschäftigt sei, sowie einem Bauleiter,

welcher (bei guter Vorarbeit) nochmals ein bis drei Tage benötigen würde, um die Erfassung durchzuführen.

### Anwendung konventioneller Erfassungsmethoden

Zunächst wird die Anwendung konventioneller Erfassungsmethoden der Leistung betrachtet, die in Abschnitt 2.1.7 erläutert wurden. Es werden die vier Unterkategorien (Abbildung 19) zur Erfassung des Fertigstellungsgrades sowie von Material, Personal und Geräten unterschieden.

#### *Erfassung Fertigstellungsgrad*

Die Erfassung des Fertigstellungsgrades wird von den Befragten meist mit der Erstellung von Aufmaßen beschrieben. Diese werden tiefbauüblich händisch vor Ort mittels diverser Messinstrumente aufgenommen. Die Erstellung des Aufmaßes per Ausführungsplan wird ebenso benannt, die jedoch noch eine visuelle Bestätigung benötigt, dass das Bauteil vor Ort hergestellt ist. Die Erfassung des Bauteils bzw. Objektes wird durch Zählen und Messen mit Messrad, Gliedermaßstab, Bandmaß und Dokumentation per Foto beschrieben. Aufnahmen per Tachymeter und die Erstellung von digitalen Geländemodellen werden vereinzelt erwähnt. Ebenso ist die Rede von einzelnen Versuchen, per Drohnenaufnahme den Ist-Stand abzubilden.

Als zweite bedeutende Methode wird das Schätzen des Fertigstellungsgrades benannt. Die Qualität des Schätzens ist von dem Erfahrungsgrad der ausführenden Person abhängig. Hinzu kommt die Nachweislegung mittels visueller Bestätigung durch Fotos oder das Abschätzen unter der Hinzunahme von Fotos, Ausführungsplänen sowie Wochen- und Tagesberichten.

Weitere angeführte Methoden zur Erfassung des Fertigstellungsgrades sind die Erfassung der Ist-Werte im Bauzeitenplan und die Abschätzung der jeweils noch nötigen Dauer zur Fertigstellung sowie die Auswertung der Kosten, welche als Vergleich herangezogen werden – jedoch ohne jeglichen visuellen Vergleich. Die Erfassung des Fertigstellungsgrades per Modell wurde lediglich von einem Unternehmen genannt.

#### *Erfassung Material*

Die Erfassung des Materials erfolgt visuell und per täglicher Dokumentation. Diese wird über Bautagesberichte, Excel-Tabellen, Bauzeitenplan und Fotos geführt. Häufig wird auch die direkte Eingabe in ein Tablet genannt. Da dies ebenso eine manuelle Eingabe durch den Erfasser erfordert, wird diese den konventionellen Methoden zugeordnet. Die Aufnahme der tatsächlichen Mengen erfolgt dabei meist durch Zählen und Schätzen der Massen oder auch durch einfache Rechnungen, indem bspw. die LKW-Fuhren mit dem möglichen Inhalt multipliziert werden. Die Erfassung der Lieferscheine und deren Angaben werden als weitere Möglichkeit angeführt. Gravierend ist jedoch in diesem Zusammenhang, dass nicht von einer automatisierten Erfassung der Daten, sprich per QR-Code etc. ausgegangen wird, sondern diese händisch übertragen werden.

Es werden ebenso Verfahren eingesetzt, welche zur Erstellung von Aufmaßen und Ermittlung des Fertigstellungsgrades herangezogen werden, z. B. die Erstellung und Auswertung von digitalen Geländemodellen und deren Aufnahme durch Rover-Einheiten oder Tachymeter. Eine Ausnahme bildet die Erfassung des Materials per Lieferkettenverfolgung, welche bei

Abladen direkt auf der Baustelle und als eingebaut gemeldet wird. Dies findet derzeit vor allem beim Asphaltbau Anwendung.

#### *Erfassung Personal*

Trotz Einsatzes vielfältiger Software zu Erfassung des Personals wird dieses immer manuell im jeweiligen System gepflegt und händisch am jeweiligen Endgerät eingegeben. Die Übermittlung der Daten an die Buchhaltung erfolgt teilweise automatisiert mittels Schnittstelle zwischen den Programmen. Vereinzelt findet die Erfassung noch per analogem Personalbogen bzw. Lohnstundenbericht statt.

#### *Erfassung Geräte*

Wie beim Personal erfolgt die Erfassung der Geräte meist per manueller Eingabe in ein Softwaresystem, welches teilweise täglich gepflegt wird. Spezielle Gerätemanagementsoftware besitzt zumeist eine Schnittstelle zum Buchhaltungsprogramm und übermittelt entsprechend automatisiert die Daten. Zusätzlich werden analoge Berichte zur Erfassung und Dokumentation der Geräte genutzt, welche auch per PDF-Formular oder Excel-Tabelle abgebildet werden. Eine recht späte Erfassung der Gerätschaften erfolgt, wenn diese nur über eingehende Rechnungen von Mietfirmen erfasst werden, was immer wieder Anwendung findet. Lediglich ein Unternehmen verwendet für die Erfassung per QR-Code einen automatisierten Weg. Per Echtzeitübermittlung werden nach dem Scannen des QR-Codes am Gerät durch den Polier alle Daten übermittelt und auf die entsprechende Baustelle mit jeweiliger Einsatzzeit gebucht.

#### Konflikte

Ziel der Frage nach Konflikten und Problemen im derzeitigen Prozess der Leistungserfassung war es die Problemquellen zu eruieren und aufzuzeigen sowie mögliche Verbesserungen daraus abzuleiten.

Als eines der größten Probleme im Prozess der Leistungserfassung wird die aufwendige, händische Eingabe der Leistungswerte für jede einzelne Position beschrieben, welche auf den erfassten Kosten, Aufmaßen sowie Schätzungen basiert. Die im Vorfeld stattfindende Erfassung dieser Werte wird ebenso als kritisch angesehen, zum einen, weil dies oft Schätzungen sind und eine korrekte Datenerfassung diesbezüglich erschwert wird. Korrekte und detailliert aufgemessene Werte der Bauteile werden jedoch von den Befragten verlangt. Zum anderen fehlt oft die Zeit, Daten korrekt und generell zu erfassen. Oft führt dies zum Problem, wenn zum Monatswechsel aufgrund des Bauprozesses größere Mengen und Leistungen umgesetzt werden und diese nicht im geforderten Zeitraum für die Leistungsmeldung erfasst werden können. Kurzfristige Änderungen, welche wiederum erfasst werden müssten, werden ebenso in diesem Kontext aufgeführt.

Die tagesaktuelle manuelle Erfassung der Aufwände von Personal, Geräten und Material im Softwaresystem nimmt viel Zeit in Anspruch und stellt somit den Prozess dieser Erfassung infrage. Die Kostenerfassung von Nachunternehmern, die ihre Rechnungen zu einem späteren Zeitpunkt einreichen und wo somit die Schätzwerte nicht mit den Rechnungswerten übereinstimmen, wird oft als Problem aufgeführt – ebenso Fehlbuchungen, falsch eingeschätzte oder gar nicht erfasste Kosten.

Des Weiteren werden Probleme angeführt die durch Personal entstehen, welches durch Weggang oder Wechsel nicht mehr zur Verfügung steht und wo wichtige Daten sowie Erfahrungswerte und Wissen verloren gehen.

Ein weiterer beschriebener Konflikt besteht darin, die Unterschiede von Projekt zu Projekt bei der Leistungserfassung zu beseitigen, indem ein Standard erarbeitet und dadurch eine Vereinheitlichung erreicht wird. Die Bereitschaft und Akzeptanz der Projektbeteiligten neue Wege zu gehen wird erst dann gegeben sein, wenn ein Mehrwert für die Projektbeteiligten absehbar ist.

### 3.2.2 Prozess der Leistungsmeldung

Der Anlass zur Durchführung der Leistungserfassung ist die Leistungsmeldung. Die Untersuchung hatte zum Ziel die Leistungsmeldung in ihrer Gesamtheit und den aktuellen Prozess abzubilden. Die Auswertung zur Leistungsmeldung ist unterteilt in Ablauf, Aufwand und Konflikte bei Erstellung der Leistungsmeldung (Abbildung 20).



Abbildung 20: FB 3 Prozess der Leistungsmeldung

#### Ablauf der Leistungsmeldung

So wie bei der Leistungserfassung lässt sich festhalten, dass die Leistungsmeldung meist monatlich stattfindet und die Auswertung der aufgenommenen Daten der Leistungserfassung darstellt. Die Leistungsmeldung steht somit im zeitlichen Zusammenhang mit der Leistungserfassung und baut auf diese auf.

Anhand der Leistungsmeldung werden die Soll-Kosten festgestellt und mit den Ist-Kosten verglichen. Die Ist-Kosten werden aus der Buchhaltung bzw. dem Buchhaltungsprogramm übermittelt. Die Soll-Kosten ergeben sich durch Multiplikation der erfassten Mengen mit dem Einheitspreis. Damit diese korrekt sind und dem Bauablauf entsprechen, bedarf es einer aktuellen Arbeitskalkulation. Oft basieren diese Mengen auf der Abrechnung und Rechnungsstellung gegenüber dem Auftraggeber, weshalb sie häufig als Grundlage für die Leistungsmeldung genommen werden, auch wenn diese nicht zwingend gleich sind und die tatsächliche Leistung daher verfälscht sein kann.

Hinzu kommen Leistungen durch Nachträge, welche durch den Bauleiter bez. ihrer anrechenbaren Leistung eingeschätzt und bewertet werden sowie vorzunehmende Abgrenzungen bez. lagerndem Material, im Voraus berechneten Leistungen, nicht eingegangenen Nachunternehmer- und Materialrechnungen etc.

Grundsätzlich enthält die Leistungsmeldung (laut den Befragten) folgende Daten: Baubeginn, Bauende, Auftragswert, Ist-Kosten zum Stichtag, Erlöse zum Stichtag, die Differenz zwischen

Kosten und Erlösen, bereits erhaltene Zahlungen sowie die aktuelle Differenz zur Rechnungsstellung.

Die Gegenüberstellung und Auswertung der aufwendig zusammengetragenen Daten erfolgten meist in einer Excel-Tabelle.

Des Weiteren wird die Leistung vereinzelt über eine sogenannte Restkostenbetrachtung eruiert. Dies impliziert die Subtraktion von voraussichtlichen Abrechnungsmengen zu geleisteten Mengen, woraus sich die noch anstehenden Restkosten ermitteln lassen.

Liegt eine funktionale Ausschreibung vor, wird die Leistung durch prozentuale Ansätze der einzelnen Pauschalleistungen bestimmt.

Im Anschluss der Leistungsmeldung wird diese oft in einem gemeinsamen Gespräch mit den Vorgesetzten nochmals erörtert und plausibilisiert.

Des Weiteren wird von den Befragten geäußert, dass die Leistungsmeldung in eine Gesamtbetriebsleistungsmeldung einfließt, um das Jahresergebnis des Unternehmens abschätzen zu können. Diese Aussage stellt noch einmal die Bedeutung einer korrekten Leistungsmeldung heraus.

#### *Arbeitskalkulation*

Eine Arbeitskalkulation wurde von einigen Befragten als explizit für eine korrekte und nutzbringende Leistungsmeldung beschrieben. Aus diesem Grund wird auf diese nochmals gesondert eingegangen, sofern dieser durch den Befragten besondere Aufmerksamkeit geschenkt wurde.

Die erste Arbeitskalkulation in einem Projekt, umgangssprachlich *Arbeitskalkulation Null*, basiert auf der Auftragskalkulation. Die Arbeitskalkulation ist vom Bauleiter vor Baubeginn zu analysieren und nach aktuellem Bauablauf, aktuellen Zeit- und Aufwandswerten zu aktualisieren und an mögliche neue Gegebenheiten des Projektes anzupassen. Für eine Überprüfung der Leistungs- und Aufwandswerte ist diese fortzuschreiben. Auf Basis der Fortschreibung wird die Leistungsmeldung angefertigt.

Es wird hervorgehoben, dass eine Arbeitskalkulation einen aktuellen Bauablauf voraussetzt, im Tiefbau dieser jedoch aufgrund vieler unbekannter Faktoren häufigen Änderungen unterzogen wird und man nicht ständig die sehr zeitaufwendige Anpassung der Arbeitskalkulation vornimmt. Prinzipiell wird auch festgehalten, dass der Vorgang mittels Arbeitskalkulation nicht in jedem Projekt geführt wird, sondern erst ab einer bestimmten Projekt- und Umsatzgröße.

Letztlich kann festgehalten werden, dass ohne aktuelle Arbeits- oder Auftragskalkulation, die den aktuellen Gegebenheiten entspricht, immer mit Unschärfen in der Leistungsmeldung gerechnet werden muss.

#### Aufwand der Leistungsmeldung

Ist die Leistungserfassung im Vorfeld mit allen notwendigen Daten korrekt abgeschlossen, bedarf die Leistungsmeldung an sich keines großen Aufwandes. Die Befragten geben dies mit einem Aufwand von drei Stunden bis zu einem Tag wieder, betonen jedoch explizit, dass jegliche Dokumentation dafür abgeschlossen sein muss, da dies den eigentlichen Aufwand

beinhaltet. Vereinzelt wird der Prozess mit einer Woche, meist sogar mit bis zu zwei Wochen beschrieben. Dies impliziert die Erstellung der Leistungsmeldung vom Bauleiter und weitere innerbetriebliche Auswertungen.

Ein ad hoc-Abruf der tatsächlichen Leistungsmeldung ist trotz des geringen Aufwandes nicht möglich und benötigt einen entsprechenden Vorlauf.

### Konflikte der Leistungsmeldung

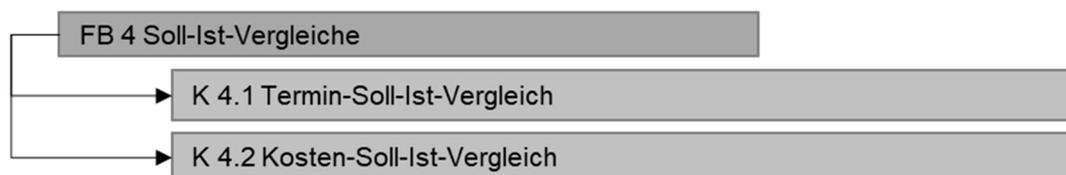
Als größtes Problem der Leistungsmeldung wird der Stichtagsbezug identifiziert, da Aufmaße und Mengenermittlungen selten genau den letzten Tag eines Monats abbilden. Als weiterer expliziter Punkt kann die Schnittstellenproblematik benannt werden (ausgelöst sowohl durch menschliche Interaktionen, aber auch durch softwaretechnische Ursachen), die zu Schwierigkeiten im Prozess der Leistungsmeldung führt und somit keinen durchgängigen und reibungslosen Prozess gewährleistet. Es wird der Mensch an sich vermehrt als Problem angeführt, da der Prozess und vor allem die Ergebnisdarstellung von ihm abhängig und das Ergebnis auf Richtigkeit somit schwer nachzuprüfen ist.

Allgemein werden folgende Punkte identifiziert, die einer reibungslosen Leistungsmeldung entgegenstehen: Die bereits erbrachte, jedoch nicht erfasste und gemeldete Leistung. Ebenso der entgegengesetzte Fall der bereits als fertiggestellt gemeldeten, jedoch noch nicht erbrachten Leistung. Des Weiteren stellen immer wieder wertemäßig richtige Abgrenzungen ein Problem in der Leistungsmeldung dar sowie die inhaltlichen Unterschiede der technischen und kaufmännischen Kostenarten.

Die Einschätzung des Fertigstellungsgrades wurde immer wieder als Hauptproblem, auch im Umfeld der Leistungsmeldung, identifiziert, obwohl dies der Zugehörigkeit der Leistungserfassung (Abschnitt 3.2.1) entspricht.

### **3.2.3 Soll-Ist-Vergleiche**

Im Grundlagenteil (Abschnitt 2.1.6) der vorliegenden Arbeit wurde zusätzlich zur Leistungsmeldung die Baufortschrittskontrolle als wesentliches Steuerungselement im Baustellen-Controlling beschrieben. Aus den Interviews zur Bauleistungsfeststellung und Leistungsmeldung konnten zwei relevante Soll-Ist-Vergleiche identifiziert und ausgewertet werden. Die nachstehende Abbildung greift diese auf (Abbildung 21).



**Abbildung 21: FB 4 Soll-Ist-Vergleiche**

#### Termin-Soll-Ist-Vergleich

Die Aussagen zu einem Soll-Ist-Vergleich bezüglich der Termine und des Bauzeitenplanes sind sehr unterschiedlich und werden sehr differenziert gehandhabt.

Es kann identifiziert werden, dass bei den meisten Unternehmen kein zeitlicher Soll-Ist-Vergleich im Zuge der Leistungsmeldung stattfindet. Dieser wird getrennt von der Bauleistungsfeststellung und Leistungsmeldung von täglich bis hin zu einmal im Monat erfasst.

Dabei erfolgte auch die Auswertung bzw. Fortschreibung sehr differenziert. Es ist die Rede von einem reinen visuellen Vergleich, ohne jegliche Software, und dem Fortschreiben eines Bauzeitenplanes, was die Nachvollziehbarkeit sowie fundierte Angaben zum terminlichen Stand der Maßnahme sehr schwer gestaltet. Andere Interviewte wiederum berichten, dass eine wöchentliche Abstimmung mit den Bauleitern erfolgt und im Zuge dessen der Bauzeitenplan fortgeschrieben wird.

Es kann aus der Auswertung entnommen werden, dass ein bauzeitlicher Soll-Ist-Vergleich bei den meisten Unternehmen durchgeführt und dieser auch als relevant betrachtet wird. Besonders hervorzuheben sind zwei Auswertungen, welche darstellen, dass der Bauzeitenplan und dessen Soll-Ist-Vergleich in Korrelation der Kosten gesehen wird und Ressourcen hinterlegt sind, womit diesem Soll-Ist-Vergleich eine höhere Wertung zugesprochen werden kann, da die Aussagekraft zum Stand des Bauprojektes höher ist. Einen Soll-Ist-Vergleich nur dann durchzuführen, sofern eine Verschiebung der Bauzeit mit vertraglichen und hohen kostenmäßigen Konsequenzen einhergehen würde, wird nur von einem Unternehmen bestätigt.

#### Kosten-Soll-Ist-Vergleich

Im Gegensatz zum bauzeitlichen Soll-Ist-Vergleich lässt sich identifizieren, dass der Kosten-Soll-Ist-Vergleich von den befragten Unternehmen meist im Zuge der Leistungsmeldung angefertigt wird und als wesentliches Steuerungselement der Baustelle betrachtet wird.

Es kann festgehalten werden, dass alle Befragten einen Kosten-Soll-Ist-Vergleich in regelmäßigen Abständen durchführen. Wöchentlich, zweiwöchentlich und einmal im Monat im Zuge der Leistungsmeldung wurden als regelmäßige Abstände erörtert. Im selben Atemzug wird jedoch auch bemängelt, dass die Ist-Kosten, aufgrund von Rechnungseingängen bis in den Folgemonat, meist erst verspätet feststehen und das Abschlussergebnis oftmals erst Mitte des Folgemonats feststeht.

Die Soll-Kosten werden anhand der Arbeitskalkulation ermittelt und im Zuge der Leistungsmeldung wiedergegeben. Die Ist-Kosten stammen aus zusammengefassten Rechnungen und Personalaufwänden, die in der Buchhaltung eingehen und zum Vergleich herangezogen werden.

Des Weiteren sind im Zuge des Kosten-Soll-Ist-Vergleiches einige bedeutende Aussagen wiedergegeben worden, die bez. einer Verbesserung des Gesamtprozesses einen hohen Stellenwert einnehmen. Der Kosten-Soll-Ist-Vergleich stellt eine Momentaufnahme zu einem gewissen Zeitpunkt dar, vernachlässigt jedoch eine Betrachtung zum Bauende, was aber ein relevanterer Part wäre, um eine Baustelle effektiv zu steuern.

Der Kosten-Soll-Ist-Vergleich ist geprägt von den Leistungsansätzen der Kalkulation/Arbeitskalkulation, um die Soll-Werte zu ermitteln. Dieser gesamte Prozess sollte verbessert werden, da neben der Leistungsmeldung die Arbeitszeit zu gering ist, einen fundierten Kosten-Soll-Ist-Vergleich durchzuführen.

Der Kosten-Soll-Ist-Vergleich wird herangezogen, um Fehlentwicklungen der Baustelle schnell entgegensteuern zu können. Voraussetzung dafür ist ein zeitnaher Kosten-Soll-Ist-Vergleich. Das Unternehmen mit diesem Bezug führt einen wöchentlichen Kosten-Soll-Ist-Vergleich durch und kann dadurch zeitnahe Gegensteuerungsmaßnahmen ergreifen.

### 3.3 Digitale Ansätze der Bauleistungsfeststellung und Leistungsmeldung

Mit dem dritten Fragenblock (Abbildung 17, S. 63) erfolgte die Analyse des Ist-Zustandes von digitalen Anwendungen in der Bauleistungsfeststellung und Leistungsmeldung. Die Auswertung beantwortet den zweiten Teil der grundlegenden Forschungsfrage der durchgeführten Studie. Welche digitalen Ansätze werden bei der Leistungserfassung und -darstellung bereits verfolgt und angewandt? (Abbildung 15, S. 61)

Der dritte Fragenblock hatte das Ziel, die Wissenslücke im Bereich über den aktuellen Stand der Digitalisierung in nationalen Straßen-Tiefbauunternehmen zu schließen. Unterteilt sind die Ergebnisse in drei Fragenbereiche und acht Kategorien exklusive zugehöriger Unterkategorien, welche der folgenden Abbildung 22 entnommen werden können.

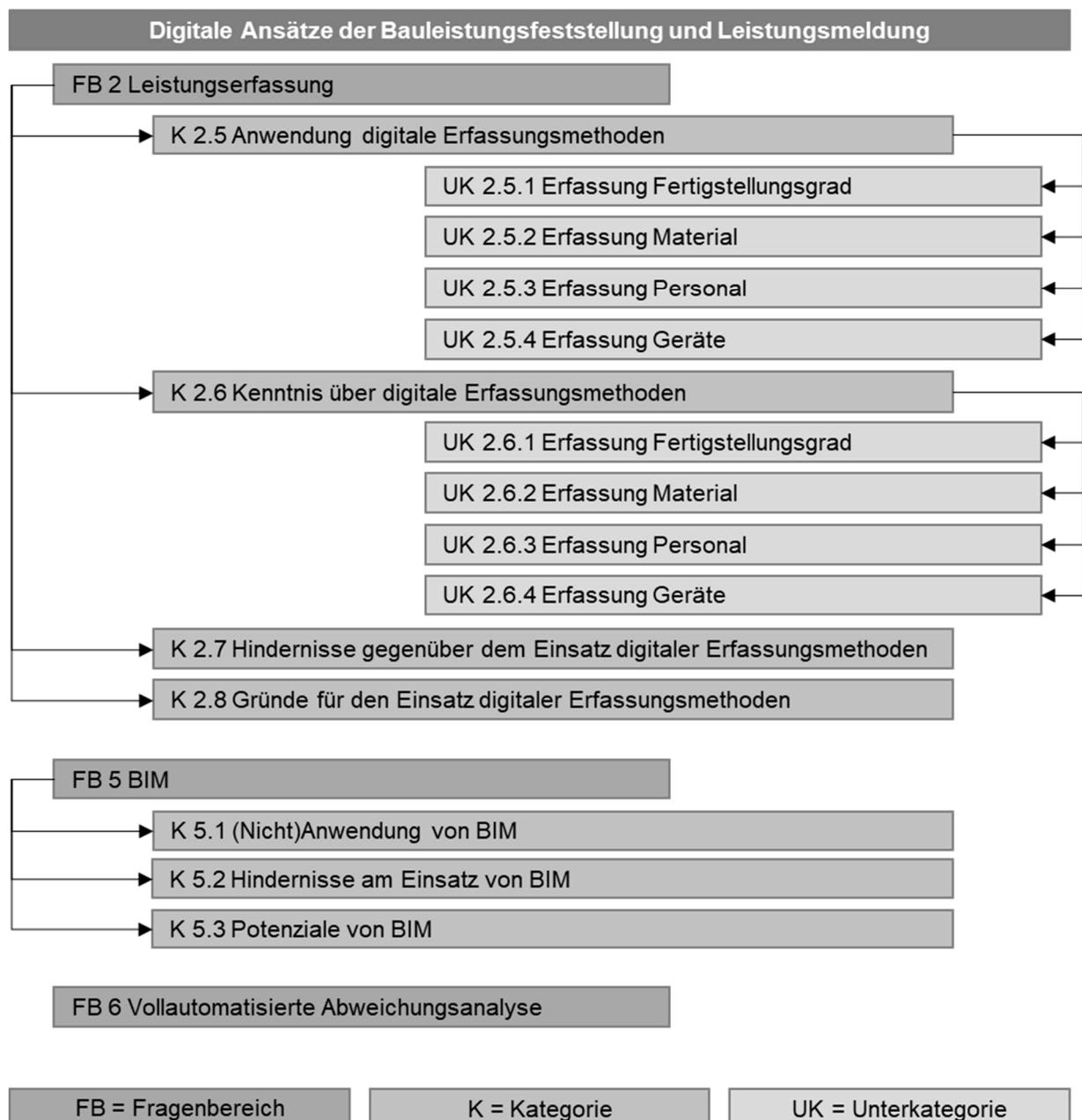


Abbildung 22: Digitale Ansätze der Bauleistungsfeststellung und Leistungsmeldung

### 3.3.1 Leistungserfassung

Die Frage nach der Leistungserfassung mittels digitaler Anwendungen hatte das Ziel, einen Überblick über die derzeit digital angewandten Methoden der Leistungserfassung zu erhalten sowie das prinzipielle Vorgehen mittels digitaler Methoden zu erörtern. Unterteilt sind die Ergebnisse der Leistungserfassung in Anwendung digitaler Erfassungsmethoden, Kenntnis über digitale Erfassungsmethoden, Hindernisse am Einsatz digitaler Erfassungsmethoden sowie Gründe für den Einsatz digitaler Erfassungsmethoden (Abbildung 23).



Abbildung 23: FB 2 Leistungserfassung – digitale Anwendung

#### Anwendung digitaler Erfassungsmethoden

Im vorliegenden Abschnitt wird die Anwendung digitaler Erfassungsmethoden der Leistung betrachtet, die in Abschnitt 2.3 erläutert wurden. Simultan zur Anwendung konventioneller Erfassungsmethoden werden vier Unterkategorien zur Erfassung von Fertigstellungsgrad, Material, Personal und Geräten unterschieden.

#### *Erfassung Fertigstellungsgrad*

Die Auswertung zur Erfassung des Fertigstellungsgrades mittels digitaler Anwendungen und Methoden hat ergeben, dass dieser meist per digitale Vermessung festgehalten wird. Die Anwendungen an sich sind verschieden und den Gegebenheiten angepasst. Die Erfassung erfolgt bei kleineren Abmessungen oft per GPS, dem sogenannten GPS-Rover-Stab, mit welchem die GPS-Koordinaten aufgenommen und ausgewertet werden. Ebenso wird die Aufnahme per Tachymeter genannt, mit dem ebenso Vermessungskoordinaten ermittelt und im Nachgang zur Erfassung des Fertigstellungsgrades ausgewertet werden. Handelt es sich um die Aufnahme des Fertigstellungsgrades bei größeren Maßnahmen im Straßen- und Tiefbau, dann wird zumeist eine Punktwolke per Drohne erzeugt und manuell ausgewertet. Ebenso werden diese Auswertungen für die Mengenermittlung verwendet. Der Einsatz per

Laserscan kommt vereinzelt zur Anwendung. Dessen Reichweite ist begrenzt, weshalb bereits versucht wird dies per Fahrzeug über die Baustelle zu führen. Lediglich ein Unternehmen verwendet für die Erfassung des Fertigstellungsgrades eine Logistikplattform, welche in Echtzeit die Materialverfolgung und Lieferung abbildet und per Eintreffen des Materials den Fertigstellungsgrad ermittelt. Dies wird explizit für den Asphalteinbau beschrieben und ist letztlich nur anwendbar bei Materialien, die aufgrund ihrer Gegebenheiten des Werkstoffes direkt bei Anlieferung verbaut werden müssen. Es ist festzuhalten, dass bereits diverse digitale Methoden zur Ermittlung des Fertigstellungsgrades angewandt werden, diese immer eine digitale Vermessungsaufnahme darstellen und vom Fachpersonal im Nachgang mühevoll zu bearbeiten und auszuwerten sind, um anhand dessen den Fertigstellungsgrad zu bestimmen.

#### *Erfassung Material*

Auch in der Materialerfassung wird auf die Erfassung per digitale Vermessung gesetzt. So werden Anwendungen per GPS, Laserscan und zumeist die photogrammetrische Auswertung einer Punktwolke durch Aufnahme einer Drohne beschrieben. Zeitgleich wird mit allen Methoden ein sehr aufwendiger Prozess identifiziert und beschrieben, weshalb diese Anwendungen keinen durchgängigen Einsatz erfahren. Weitere Anwendung in der Erfassung von Material implizieren die Identifizierung von Objekten mittels Bar- bzw. QR-Code, der entweder direkt auf dem jeweiligen Objekt oder auf dem Lieferschein gescannt wird.

#### *Erfassung Personal*

Vereinzelt findet die Erfassung des Baustellenpersonals per GPS-Tracking statt. Zumeist wird auf eine digitale Erfassung per entsprechender Software oder mittels App verwiesen, welche jedoch mit händischer und manueller Eingabe von Führungspersonal auf der Baustelle verbunden ist und nach Abschnitt 2.3 nicht den Technologien der automatisierten Erfassung zugewiesen werden kann.

#### *Erfassung Geräte*

Für die Erfassung der Geräte können zwei Methoden identifiziert werden. Zum einen erfolgt dies per GPS-Tracking, welches zwei Befragte bestätigen, und zum anderen per QR-Code-Erfassung. Letztlich ist festzuhalten, dass gerade einmal von drei Befragten die Auswertung ausging und prinzipiell auf konventionelle Methoden gesetzt wird bzw. ähnlich wie bei der Personalerfassung vermehrt auf die tägliche, händische Eingabe in einer entsprechenden Software verwiesen wird, die die Geräte verwaltet und zur Auswertung herangezogen wird.

#### Kenntnis über digitale Erfassungsmethoden

Bezug nehmend auf die vierte Leitfrage des Abschnitts 3.1.1 wurde der vorliegende Abschnitt zu Kenntnissen über digitale Erfassungsmethoden erhoben. Ziel war es aufzuzeigen, welches Vorgehen und welche Methoden den Befragten bereits bekannt sind und welche diese ggf. selbst einsetzen würden, derzeit jedoch noch nicht anwenden.

#### *Erfassung Fertigstellungsgrad*

Kenntnisse bez. der Erfassung des Fertigstellungsgrades mit digitalen Methoden gehen vor allem auf die Anwendung von digitaler Vermessung zurück. Es werden vorwiegend die Systeme per GPS-Rover-Stab, Tachymeter, Laserscan und mit Aufnahme einer Punktwolke per Drohne benannt. Als besonders interessant wird mehrfach die Erfassung per Drohne

angesprochen, im gleichen Atemzug jedoch auch der immense zeitliche Aufwand der Vor- und Nachbereitung, den dieses Vorgehen erfordert. Des Weiteren können sich Systeme vorgestellt werden, die das ausführende Gerät einem Vorgang zuordnet und darüber den Fertigstellungsgrad feststellen lässt. Infolgedessen wird das System mittels Basis über ein Tachymeter beschrieben, welches alle Geräte miteinander verbindet und wo sich bez. der örtlichen Einordnung feststellen lässt, welcher Vorgang gerade ausgeführt wird. Ebenso wird die Erfassung per Geofence beschrieben, indem in einem bestimmten Bereich eine Aktivität wahrgenommen wird und unter einem bestimmten Zeitintervall der bauausführenden Aktivität zugeordnet wird. Der Nachteil beider Verfahren ist jedoch, dass mittels dieser Systematik nie der Nachweis erbracht werden kann, dass das Objekt tatsächlich erstellt wurde. Auch die Auswertung diverser Maschinendaten führen die Befragten als mögliche Option an, den Fertigstellungsgrad zu ermitteln sowie die Lieferkettenverfolgung für Materialien vorzunehmen, die aufgrund ihrer Konsistenz direkt vor Ort verbaut werden müssen und man zeitgleich von einem hergestellten Bauteil ausgeht, auch wenn dies kein Nachweis ist.

Es wird ebenso die Erfassung in Modellen als Option bzw. die Erfassung über die BIM-Methodik gewünscht, jedoch zeitgleich darauf verwiesen, dass die Rückführung der Daten aus den diversen Erfassungsvarianten nicht umgesetzt ist und daher im Unternehmen noch keine Anwendung findet.

#### *Erfassung Material*

Wie bei der Erfassung des Fertigstellungsgrades wird in der Erfassung des Materials auf die digitale Vermessung mittels diverser Verfahren gesetzt. Es sind alle Verfahren der Aufnahme per GPS, per Tachymeter, per Laserscan, per Drohne genannt worden, ebenso der Vorteil der daraus auswertbaren Erstellung von Aufmaßen, auch wenn dies händisch erfolgt. Weitere bekannte Verfahren sind die Erfassung per Bar- bzw. QR-Code direkt am jeweiligen Lieferstück oder per Scannen des Lieferscheines, ebenso die Erfassung über Wiegesysteme direkt am Endgerät, was beim direkten Verwerten und Wiedereinbau des Materials von Vorteil ist. Die Erfassung des Materials per RFID, indem Fahrzeuge direkt beim Befahren der Baustelle ausgelesen werden, wurde einmal genannt und konnte jedoch nicht einmal in der tatsächlichen Anwendung identifiziert werden. Große Hoffnungen ruhen jedoch auf der direkten Lieferkettenverfolgung beim Asphalteinbau.

#### *Erfassung Personal*

In der tatsächlichen Anwendung wurde einmal auf die Erfassung per GPS verwiesen, bekannt sind jedoch auch weitere automatisierte Verfahren der Personalerfassung. RFID-Chips, mit denen sich Mitarbeiter an diversen Orten ab- und anmelden können, wurden als weiteres Beispiel identifiziert.

#### *Erfassung Geräte*

Die bekannten automatisierten Erfassungsverfahren der eingesetzten Geräte gleichen den bereits angewendeten Verfahren. Es wird GPS-Tracking sowie die Erfassung per QR-Code wiedergegeben. Letztlich kann festgehalten werden, dass wie bei der Personalerfassung oft die händische Eingabe in einer Software bzw. App als digitaler Fortschritt angesehen wird und dies bereits ausgeführt bzw. erwünscht wird, auch wenn dies nicht einer automatisierten Erfassung nach Abschnitt 2.3 entspricht.

### Hindernisse gegenüber dem Einsatz digitaler Erfassungsmethoden

Ziel der Frage nach Hindernissen und Problemen in der Erfassung und am Einsatz mittels digitaler Methoden war es deren Quellen zu eruieren und aufzuzeigen sowie Verbesserungsansätze daraus abzuleiten.

Die Auswertung und Analyse ergab folgende Einflussfaktoren:

Die bestehenden und vorhandenen Werkzeuge sind der Schlüsselfaktor beim Einsatz digitaler Erfassungsmethoden. So werden gezielt deren Einschränkungen benannt. In der Erfassung des Fertigstellungsgrades per Punktwolkenaufnahme mittels Drohne ist die notwendige Fluggenehmigung oft hinderlich bzw. wird nicht ausgestellt. Des Weiteren werden die Themen fehlender Referenzpunkte als Bezugssystem genannt. Es werden ebenso Werkzeuge erwähnt, die in der Erfassung von Material und Personal einen hohen Stellenwert einnehmen, wie bspw. die Erfassung per QR- und Bar-Code. Deren Verfügbarkeit stellt ebenfalls einen kritischen Faktor dar, da alle Projektbeteiligten inkl. der Nachunternehmer und Lieferanten mit demselben Standard arbeiten müssten.

Unisono werden die Datenauswertung und Datenübergabe mittels einheitlicher Schnittstellen infrage gestellt, womit die Benutzerfreundlichkeit des Gesamtprozesses sowie die nachweisliche Wirksamkeit und Effizienz verloren geht. Der Prozess von der Erfassung und Auswertung der Daten im zu gebrauchenden Datenformat und deren Übergabe in das Gesamtsystem zur Auswertung der tatsächlichen Leistung inklusive aller zugehörigen Schnittstellen wird als großes Defizit benannt. Die erzeugte Datenmenge kann von den bestehenden Projektbeteiligten während der regulären Arbeitszeit in manueller Verfahrensweise nicht bearbeitet werden. Umso größer ist die Forderung nach Anpassung der Prozesse, um digitale Erfassungsmethoden anwenden zu können. Explizit wird die Integration und Anpassung der digitalen Systeme in den Bauprozess gefordert.

Trotzdem kann unter den ausführenden Unternehmen eine positive Anwendungsbereitschaft verzeichnet werden. Stattdessen wird die Auftraggeberseite, meist der öffentliche Bauherr, als hinderlich angesehen. Dort kann man neue Prozesse und Daten nicht verarbeiten, weshalb oft zur herkömmlichen Arbeitsweise zurückgekehrt wird. Ebenso werden Soll-Daten weiterhin in üblicher Weise übergeben und eine Anwendung von Modellen im Sinne der BIM-Methodik kommt nicht zum Tragen. Mitarbeiter und Projektbeteiligte sehen die Anwendung jedoch aufgrund neu zu lernender Systeme oft kritisch, was derzeit einen hohen zeitlichen Mehranspruch bedeutet, und Kenntnisse zu Anwendung und Umgang im Prozess und die Werkzeuge dazu fehlen. Die Anwendungsbereitschaft sinkt, da aufgrund des hohen zeitlichen Anspruchs von der Erfassung bis zur Auswertung der tatsächlichen Leistung der direkte Mehrwert für die Mitarbeiter und Projektbeteiligten in der Zeitersparnis nicht eintritt.

### Gründe für den Einsatz digitaler Erfassungsmethoden

Eine bedeutende mit dem Einsatz von digitalen Erfassungsmethoden einhergehende Verbesserung ist die Möglichkeit einer Automatisierung der Prozesse, welche wiederum durch Objektivität und durch die Unabhängigkeit des Personals mit einer Fehlerminimierung einhergeht. Es wird eine Optimierung in der Auswertung des Controllings bei verbesserter Qualität der Auswertung sichergestellt. Dabei wird eine Effizienzsteigerung erreicht, indem redundante Arbeitsabläufe und Prozesse minimiert werden. Ebenso würde die Aufnahme von

Daten erleichtert werden und dies eine direkte Zeitersparnis bedeuten. Der händische Eingabe- und Auswertungsaufwand würde reduziert werden. Eine direkte Verbindung der optischen Auswertung zu den Leistungsverzeichnispositionen würde zu allen benannten Vorteilen beitragen.

Es lassen sich bei gleichbleibender, erhöhter Qualität der Auswertung effektive Rückschlüsse auf das Baustellenergebnis sowie auf das Gesamtunternehmen bilden. Alle Beteiligten können im Kontext der BIM-Methodik mit derselben Basis arbeiten und es ist ein schneller Informationsfluss gewährleistet. Das Potenzial, aus den automatisiert erfassten Daten einen Lessons Learned-Prozess abzuleiten, ist enorm.

Auch die ökologische Betrachtung wurde von den Befragten berücksichtigt, denn die derzeit bestehende Papierflut unzähliger Pläne, Checklisten, Berichte und Schreiben kann verringert werden.

### 3.3.2 BIM

Bezug nehmend auf die Leitfrage drei und vier des Abschnitts 3.1.1 dient die nachstehende Auswertung der Befragung dazu, den Einsatz der BIM-Methodik in Straßen- und Tiefbauunternehmen zu erörtern. Im Kontext der Bauleistungsfeststellung und Leistungsmeldung sollten Anwendungen und mögliche Kombinationen aus BIM-Methodik und digitalen Erfassungsmöglichkeiten eruiert werden. Unterteilt sind die Ergebnisse des Fragenbereichs 5 in vier Kategorien (Abbildung 24)

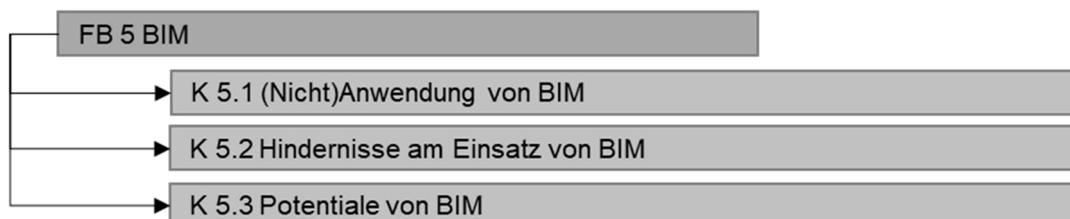


Abbildung 24: FB 5 BIM

#### (Nicht) Anwendung von BIM

Die Ergebnisse der Umfrage zeigen, dass sofern die BIM-Methodik in Straßen- und Tiefbauunternehmen Anwendung findet, dies sehr vereinzelt und nur in wenigen Teilbereichen genutzt wird und sich weit weg von einem durchgängigen Prozess befindet. Die meisten Unternehmen wenden bezüglich dieser Methodik noch nichts an und arbeiten konventionell in der Projektabwicklung des Straßen- und Tiefbaus. Der Aufwand, dies für die Projektabwicklung und Abrechnung mit den im Tiefbau unklaren Bodenverhältnissen und ständig wechselnden technischen Bedingungen aufzubereiten wäre zu groß. Benannt wird die Kalkulation, welche objektorientiert stattfindet; die Arbeitsvorbereitung, Prozesssteuerung und Ausführung nehmen sich erster Prozesse an. Teilweise finden erste Anwendungen in Großprojekten statt, jedoch ausschließlich von Auftragnehmerseite.

Oft wird von den Interviewten beschrieben, dass diese Methodik, vor allem im Straßen- und Tiefbau, noch am Anfang steht und es noch einiger Entwicklung bedarf, bis dies in der Praxis einsetzbar ist.

Lediglich ein Unternehmen verweist darauf, dass es bereits eine Weile nach der BIM-Methodik arbeitet, ein Hindernis jedoch immer wieder die öffentliche Hand darstellt und deshalb herkömmliche Prozesse noch weiter Anwendung finden.

#### Zu Hindernissen am Einsatz von BIM

Die Datenaufbereitung und -aktualisierung wird als eines der Haupthindernisse identifiziert. Die Erstellung eines Modells und dessen ständige Aktualisierung bez. der sich ändernden Bedingungen, Zusatzleistungen etc. im Tiefbau nimmt zu große Zeit in Anspruch, sodass von den Befragten kein Mehrwert gesehen wird. Der Prozess sollte entsprechend angepasst werden, um mit aktuellen Soll-Daten arbeiten zu können. Des Weiteren bedeutet die enorme Datenmenge, welche erzeugt wird, große Mühe, um einen performanten Prozess und ein dem gemäßes System zu konstruieren.

Auftragnehmerseitig wird bereits die erste Soll-Datenübermittlung kritisiert, da diese meist in ungeeigneter Art mittels 2D-Plänen, Tabellen und Texten erfolgt. An eine objektorientierte Übergabe ist derzeit nicht zu denken, wodurch sich der Aufwand seitens der Auftragnehmer zur Anwendung der BIM-Methodik erhöht und dies einen vorgelagerten Konflikt darstellt. Ist dieser Prozess gewährleistet, fehlt es oft an detaillierten Vorgaben bez. der Erfordernisse des Auftraggebers.

Im Zuge dieser Kritikpunkte sinkt die Akzeptanz und Bereitschaft der Mitarbeiter zur Anwendung der BIM-Methodik – und auch dem noch dazu bestehenden Fachkräfte- und Nachwuchsmangel kann mit dessen Einsatz nicht entgegengewirkt werden.

Der derzeitige praktisch einzusetzende Leistungsumfang der BIM-Methodik im Tiefbau ist als sehr marginal zu bezeichnen und ist für eine gesamtheitliche Projektabwicklung mit allen Projektbeteiligten nicht praktikabel. Hinzu kommen Investitionen, die getätigt werden müssen, um die Methodik vollumfänglich und nutzbringend einsetzen zu können.

#### Zu den Potenzialen von BIM

Potenzial wird der BIM-Methodik vor allem bei jenen Projekten nachgesagt, wo eine gute Ausgangsbasis zur Anwendung von digitalen Methoden vorhanden ist und bei denen Grunddaten wie ein digitales Geländemodell vorliegen und auch der gesamte Bauprozess zugrunde liegt, um darauf aufbauend entsprechende Soll-Ist-Vergleiche führen zu können.

Prinzipiell wird in der Methodik eine Zeitersparnis gesehen. Bei Änderungen sind zeitgleich alle Projektbeteiligten informiert und aktuelle Daten stehen in Echtzeit zur Verfügung. Redundante Arbeiten sind obsolet und können von der Software übernommen werden, wodurch sich Mitarbeiter mehr ihren Hauptaufgaben widmen können. Die Arbeit wird effizienter und tatsächliche Fehlentwicklungen können frühzeitig erkannt werden, wodurch eine Verbesserung der Prozesse und der Qualität eintritt.

Im Hinblick auf die Bauleistungsfeststellung und Leistungsmeldung wird besonders auf eine mögliche Auswertung der Daten verwiesen, sofern die Eingangsparameter der Leistungsfeststellung feststehen bzw. auch bei Änderungen dieser Parameter ein Ergebnis in Echtzeit abgerufen werden könnte. Solcherart Auswertung und Prozess werden derzeit noch nicht ausgeführt, aber es wird ein großer Mehrwert darin gesehen.

Als nachteilig wird jedoch der immense Aufwand betont, der zu Beginn einer Maßnahme durchzuführen ist, um diese der BIM-Methodik zu unterziehen, weshalb dies derzeit nur sehr vereinzelt Anwendung findet.

### **3.3.3 Vollautomatische Abweichungsanalyse**

Unter allen Befragten, die sich zu einer vollautomatischen Abweichungsanalyse geäußert haben, herrschte Einigkeit, dass dies eine sinnvolle Unterstützung für die Abwicklung von Projekten ist und viele Vorteile mit sich bringen könnte, sofern sie funktioniert.

So ein Prozess würde Ressourcen einsparen. Es wäre eine gute Basis, um Abweichungen schnell festzustellen und Gegenmaßnahmen ergreifen zu können. Es würde zu einer besseren Projektkommunikation beitragen, wenn die Ausgangsbasis objektive Datenanalysen sind und somit subjektive Einschätzungen und Konfliktpotenziale umgangen wären.

Jedoch gibt es Zweifel, da ein solcher Prozess durch den Unikatcharakter der Projekte schwer umsetzbar und langwierig ist. Solch automatisierter Prozess wird von allen befürwortet – letzte Prüfinstanz sollte jedoch immer der Mensch selbst sein.

Derzeit lässt weder die Literatur auf so einen Prozess schließen noch die durchgeführte vorliegende Studie.

## **3.4 Ausblick der Bauleistungsfeststellung und Leistungsmeldung**

Mit dem Fragenblock IV (Abbildung 17, S. 63) erfolgt die Analyse des Soll-Zustandes der Bauleistungsfeststellung und Leistungsmeldung. Die Auswertung greift Verbesserungsansätze und -potenziale auf. Es erfolgt eine Erörterung der Akzeptanz und Notwendigkeit der Digitalisierung der Bauleistungsfeststellung und Leistungsmeldung in Straßen- und Tiefbauunternehmen und deren zukünftige Entwicklung. Basis dieser Auswertung bilden die Leitfragen fünf und sechs des Abschnitts 3.1.1.

Unterteilt ist die Auswertung in zwei Fragebereiche und vier Kategorien exklusive zugehöriger Unterkategorien, sie können der nachfolgenden Abbildung 25 entnommen werden.

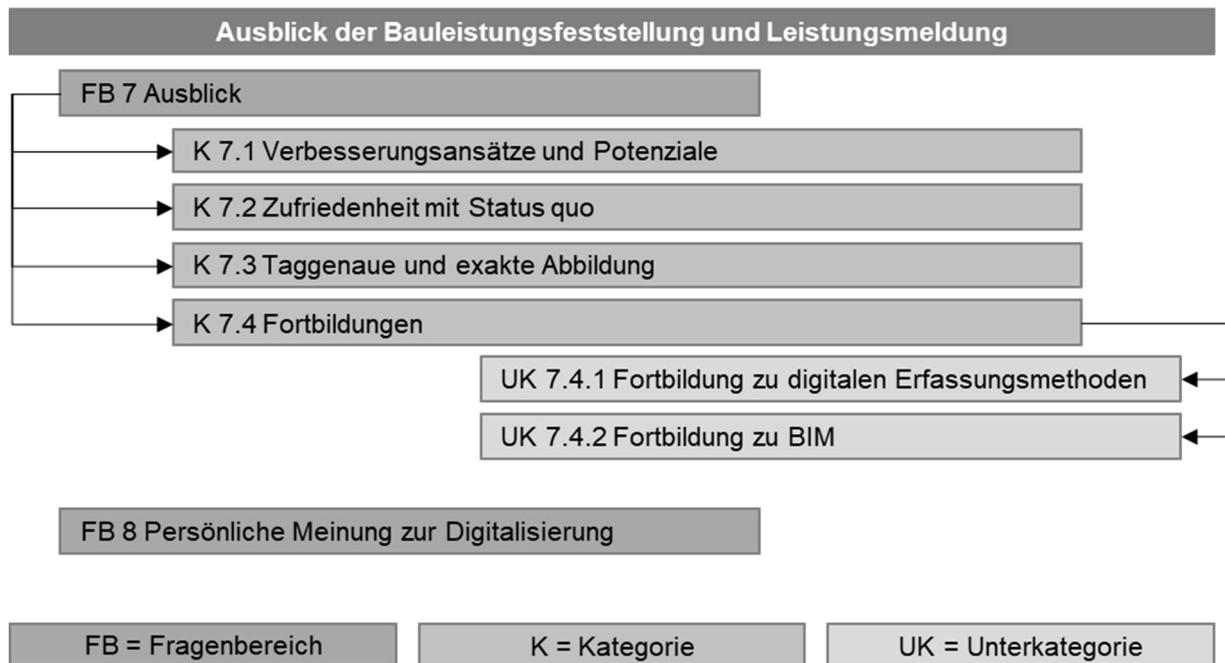


Abbildung 25: Ausblick der Bauleistungsfeststellung und Leistungsmeldung

### 3.4.1 Ausblick

Abbildung 25 kann entnommen werden, dass im Fragenbereich 7 zu *Ausblick*, vier Kategorien identifiziert wurden. Mit der nachfolgenden Kategorie 7.1 *Verbesserungsansätze und Potenziale* sollen Möglichkeiten und Ansätze aufgezeigt werden, die die Bauleistungsfeststellung und Leistungsmeldung in Anbetracht der Befragten zum jetzigen Stand modifiziert.

#### Zu Verbesserungsansätzen und Potentialen

Gleichbleibend und durchgängig wurde von den Befragten von der Aufnahme der Leistung bis hin zu deren Darstellung eine Verbesserung des Prozesses gewünscht. Es wird – in Verbindung mit funktionsfähigen, IT-technischen Schnittstellen – ein Standard der einzelnen Teilprozesse gefordert. Dies hätte zur Folge, dass durch die Standardisierung das Fehlerpotenzial sinkt sowie die Auswertung und das Controlling optimiert werden würden. Dies wiederum hätte direkten Einfluss auf den Unternehmenserfolg.

Ein immer wieder benannter Ansatz ist es, den Baufortschritt automatisiert und objektiv zu erfassen. Daraus kann die tatsächliche Leistung abgeleitet werden und subjektive Rückschlüsse, womöglich auch Fehlinterpretationen, würden der Vergangenheit angehören. Die enorme zeitliche Komponente der Erfassung der tatsächlichen Leistung ist immer wieder Thema. Hier wird sich Verbesserung gewünscht, was sich ggf. mit einem automatisierten Prozess bewältigen lässt. Es müssen genaue Angaben zu Mengen, Massen und dem tatsächlichen Fortschritt erfasst werden; Schätzmengen und subjektive Bewertungen liefern keine Erkenntnisse und inkludieren dennoch einen großen zeitlichen Aufwand.

Ein weiterer Schwerpunkt ist die Korrektheit der Daten und Auswertung, die derzeit nicht geprüft bzw. nachvollzogen wird. Dadurch werden Fehlentwicklungen trotz immensem Erfassungsaufwand immer wieder zu spät erkannt und können nicht mehr bereinigt werden. Gewünscht wurde auch die Einführung eines Verbesserungsprozesses im Wissensmanagement, um die dort gewonnenen Erkenntnisse in andere Projekte zu

übernehmen (bspw. die Aktualisierung der Leistungsansätze). Durch die digitale Datenaufbereitung wird ein Prozess gewünscht, der die Daten und somit gewonnenen Erkenntnisse aufgreift und für andere Projekte entsprechend anwendet.

#### Zur Zufriedenheit mit dem Status quo

Mit großer Übereinstimmung werden die aktuellen Ausprägungen der Bauleistungsfeststellung und Leistungsmeldung als nicht zufriedenstellend identifiziert. Kritisiert werden der immense zeitliche Aufwand und der Personaleinsatz bei der Bauleistungsfeststellung. Dieser ist auch im Zusammenhang mit den bereits neu angewandten Methoden und Verfahren zu groß. Das Problem neuer Methoden seien nicht die Anschaffungskosten, sondern der nach wie vor zu große Zeitaufwand, für den es bisher keine Lösung und keinen standardisierten Prozess gäbe.

Die gemeinsame Betrachtung der Bauleistungsfeststellung und Leistungsmeldung ergibt ein gleiches Bild. Vorwiegend wird die nicht zufriedenstellende Qualität angesprochen. Diese ist stark personenabhängig und eine Bewertung der Maßnahme ist nicht objektiv. Hinzu kommen Fehlerquellen, welche durch die große Arbeitsbelastung der durchführenden Personen und den Fachkräftemangel hervorgerufen werden. Der Arbeitsalltag gibt den Projektverantwortlichen für eine detaillierte Analyse keinen zeitlichen Freiraum, woraus Fehler und Ungenauigkeiten resultieren. Oft sind die Arbeiten verbunden mit der Bauleistungsfeststellung und Leistungsmeldung redundant und sogar händisch nachbearbeitet, was alles andere als zufriedenstellend ist.

Es mangelt den Befragten ebenso an Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Bauleistungsfeststellung und Leistungsmeldung. Ein reines Zahlenwerk, welches oft auf subjektiven Schätzungen beruht, ist schwer nachvollziehbar und kann nicht geprüft werden. Es wird der direkte Wunsch einer modellbasierten Auswertung und objektiven Erfassung geäußert, um die Nachvollziehbarkeit und Richtigkeit zu gewährleisten.

Als zufriedenstellend wird die Erfassung der Personal-, Geräte- und Materialkosten identifiziert. Die Erfassung des Fertigstellungsgrades wird jedoch als kritisch eingeschätzt. Vereinzelt wird der Gesamtprozess unter den Befragten als ausreichend und zufriedenstellend bezeichnet. Auffällig ist hierbei, dass infrage gestellt wird, ob solch eine Prozessumstellung auf digitale Anwendungen auch sinnvoll für kleine Unternehmen ist.

#### Zu taggenauer und exakter Abbildung

In der Literatur (Abschnitt 2.1.6) sowie unter den Befragten wird immer wieder eine zeitnahe Abbildung und Kontrolle des Ist-Standes gefordert. Optimal wäre eine tägliche und taggenaue Analyse des Ist-Standes. Um diese Wirkung und tatsächliche Notwendigkeit zu identifizieren, erfolgte die explizite Erkundigung danach bei den Befragten.

Die Befragten sind sich darüber uneins. Teilweise wird eine taggenaue Abbildung des Ist-Standes als gewinnbringend bezeichnet, teilweise auch als unnützlich, da man jeden Tag ein komplett anderes Bild erhalten könnte und dies sich nicht unbedingt auf das Ergebnis zum Bauende transferieren ließe. Einigkeit herrscht darüber (sofern die tägliche Erfassung und Abbildung der Leistung keine weiteren personellen Ressourcen bedeuten und automatisiert möglich wäre), dass dies ein sinnvolles Controllinginstrument wäre. Des Weiteren hätte ein taggenaues Controlling den Vorteil, dass man von keinem Stichtag abhängig wäre und jederzeit den Status nachvollziehen kann.

Eine tägliche und exakte Abbildung des Ist-Standes wird oft bei erkannten kritischen und nicht zielerbringenden Baustellen durch zusätzliches Personal manuell durchgeführt.

Es wird ebenso angeführt, dass für Maßnahmen, die täglich getaktet sind, auch ein täglicher Vergleich zielführend ist, dies jedoch von der Baustelle und dem stattfindenden Arbeitsprozess abhängig ist und eine taggenaue und exakte Abbildung nicht zwingend erforderlich ist, jedoch die Option dazu bestehen sollte.

### Zu Fortbildungen

Die Frage bez. Fortbildungen im Kontext der BIM-Methodik und der digitalen Erfassungsmethoden hatte zum Ziel zu erfassen, ob für das Personal die Möglichkeit besteht, sich in diese Themen einzuarbeiten und ob für die erforderlichen Prozesse die Grundlagen geschaffen sind. Es wird zum einen von umfangreichen internen sowie externen Fort- und Weiterbildungsmöglichkeiten gesprochen, aber von anderen auch davon, dass keine Fort- und Weiterbildungen stattfinden und diese im Unternehmen auch nicht angedacht sind.

#### *Fortbildung zu digitalen Erfassungsmethoden*

Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, an Fort- und Weiterbildungen in den Unternehmen oder an externen Weiterbildungen teilzunehmen. Teilweise werden diese bez. der Inhalte infrage gestellt, da diese nicht anwenderbezogen sind und auch nicht an Praxisbeispielen stattfinden. Lediglich ein Unternehmen gibt an das Personal direkt vor Ort auf der Baustelle unter realen Bedingungen und der direkten praktischen Anwendung weiterzubilden. Es wird gefordert, dass die Fortbildungen auf die Verbesserung des Gesamtprozesses eingehen und anhand dessen die digitalen Anwendungen einbringen.

#### *Fortbildung zu BIM*

Analog den Fort- und Weiterbildungen zu digitalen Erfassungsmethoden besteht auch bez. der BIM-Methodik die Möglichkeit, an diversen Fortbildungen intern in den Unternehmen oder extern teilzunehmen. Kritisiert wird, dass die Weiterbildungen nie anhand eines praktischen Beispiels durchgeführt werden und erst recht nicht im Kontext des Tief- und Straßenbaus. Schnittstellenbezug wird auf Wunsch auch angeboten, stellt jedoch in der praktischen Umsetzung immer Probleme dar, da nicht auf die unternehmensinternen Gegebenheiten eingegangen wird.

### **3.4.2 Persönliche Meinungen zur Digitalisierung**

Ziel der Befragung zur persönlichen Meinung hinsichtlich Digitalisierung und BIM-Methodik im Zuge der Bauleistungsfeststellung und Leistungsmeldung war es für die Branche zu identifizieren, ob es laut den Interviewten unabhängig vom Unternehmen ein Erfordernis zur Digitalisierung des Prozesses gibt und, dass umgesetzt werden sollte.

Die interviewten Personen sind sich in der Mehrheit einig, dass ein digitalisierter Prozess, sofern dieser für alle Beteiligten von Beginn an eine Erleichterung und Zeitersparnis bedeutet, eingesetzt werden sollte. Derzeit kann ausgehend von der Literatur und Befragung noch kein solch beschriebener Prozess festgestellt werden. Die Befragten führen folgende Gründe auf:

1. Die eingesetzten Anwendungen zeigen in der Praxis keinen durchgängigen Prozess auf und diverse Schnittstellenprobleme liegen vor.

2. Die eingesetzten Anwendungen bedeuten einen erhöhten Aufwand bei der Auswertung.
3. Es fehlt an Fachpersonal, dass diese Methoden vollumfänglich anwendet und vorantreiben kann.
4. Alle Anwendungen sind einzelne Bausteine und es existiert kein Gesamtprozess.
5. Es fehlt an einem praxistauglichen Prozess im Straßen- und Tiefbau.

Einzelne sehen einen digitalen Prozess nicht als Hilfsmittel an; jedoch hat das wohl den Hintergrund, dass für sich entschieden wurde die BIM-Methodik und digitale Anwendungen nicht einzusetzen.

Weiterführend ist man der Auffassung, dass ein solcher Prozess hilfreich und mehrwertbringend ist, die letzte Prüfinstanz jedoch immer der Mensch sein sollte. Es würde nicht nur das einzelne Unternehmen von solch einem Prozess profitieren, sondern die gesamte Branche mit allen Projektbeteiligten. Dies gelingt jedoch nur, sofern auch auftraggeberseitig die Grundlage dafür geschaffen wird. Derzeit ist das noch stark eingeschränkt.

## 4 Priorisierte Anforderungen

### 4.1 Vorgehen

Anhand der Interviews konnte ein umfassender Einblick in den Kontext der Bauleistungsfeststellung und der derzeitigen Anwendungen sowie in die bestehenden Wirkprinzipien erzielt werden. Hieraus werden die Grenzen, Einflussfaktoren und Anforderungen an die derzeit eingesetzten Methoden abgeleitet. Entsprechend der Forschungsleitfrage konnten Hinweise zur Integration eines Konzeptes zur automatisierten Leistungsfeststellung in die Prozesse des Baustellencontrollings (F1.1) sowie hinsichtlich der dabei zu berücksichtigenden Rahmenbedingungen (F1.2) gewonnen werden (Abschnitt 1.3). Diese wurden anhand der Fragestellung der Experteninterviews (Abschnitt 3.1.1) analysiert und aufbereitet.

Die in den Interviews erhobenen Erkenntnisse (Kapitel 3) werden mit den aus der Literatur erhobenen Erkenntnissen abgeglichen, Anforderungen abgeleitet und priorisiert. Dies erfolgt in Anbetracht der erhobenen Rahmenbedingungen.

Das Vorgehen orientiert sich kontextbezogen an dem Usability-Engineering-Prozess aus der Softwareentwicklung. Unter Mitwirkung der Anwender hat dieser zum Ziel valide (Nutzer-) Anforderungen für die Entwicklung gebrauchstauglicher Produkte zu identifizieren. (Vgl. Tibes, 2019, S. 81; DAkkS, 2010, S. 12) Der Erfolg dieser Produkte basiert auf der Erkenntnis, dass nicht nur die technisch korrekte Umsetzung, sondern auch die Einsatzfähigkeit der Lösung unter den gegebenen Rahmenbedingungen maßgeblich ist. Zur Produktentwicklung ist es nötig die Anforderungen, die sich aus den Benutzererfordernissen unter Berücksichtigung des Nutzungskontexts und der Produktidee ergeben, zu untersuchen. (Vgl. DIN EN ISO 9241-210:2020-03, 2020, S. 23)

In Anlehnung an den Usability-Engineering-Prozess wurden im Rahmen der Auswertung der Interviews die Anforderungen direkt und indirekt abgeleitet. Direkte Ableitungen erfolgen aus jenen Kategorien, die Hindernisse, Konflikte sowie Verbesserungsansätze und Potenziale aufzeigen. Indirekt werden Anforderungen aus den Kontextinformationen, bspw. der Anwendung aktueller oder konventioneller Erfassungsmethoden, abgeleitet (Abbildung 26). Es wurden die subsumierten Aussagen aller Kategorien zur Erfassung dieser Anforderungen analysiert.

Bezug nehmend auf die Abbildung 12 (S. 47), die Vorrecherche sowie die praktischen Erfahrungen des Autors und die umfassende Literaturerhebung wurden die zu untersuchenden Erfassungsmethoden in die Unterkategorien Fertigstellungsgrad, Material, Personal und Gerät gegliedert. Auf Basis der Auswertung und der subsumierten Aussagen aller Kategorien kann identifiziert werden, dass ein grundlegender Verbesserungsbedarf in dem Prozess der Erfassung und Auswertung des Fertigstellungsgrades hin zur Leistungsmeldung besteht. Aufbauend auf diese Erkenntnis beziehen sich die nachfolgenden Analysen und Entwicklungen auf den Kontext des Fertigstellungsgrades.

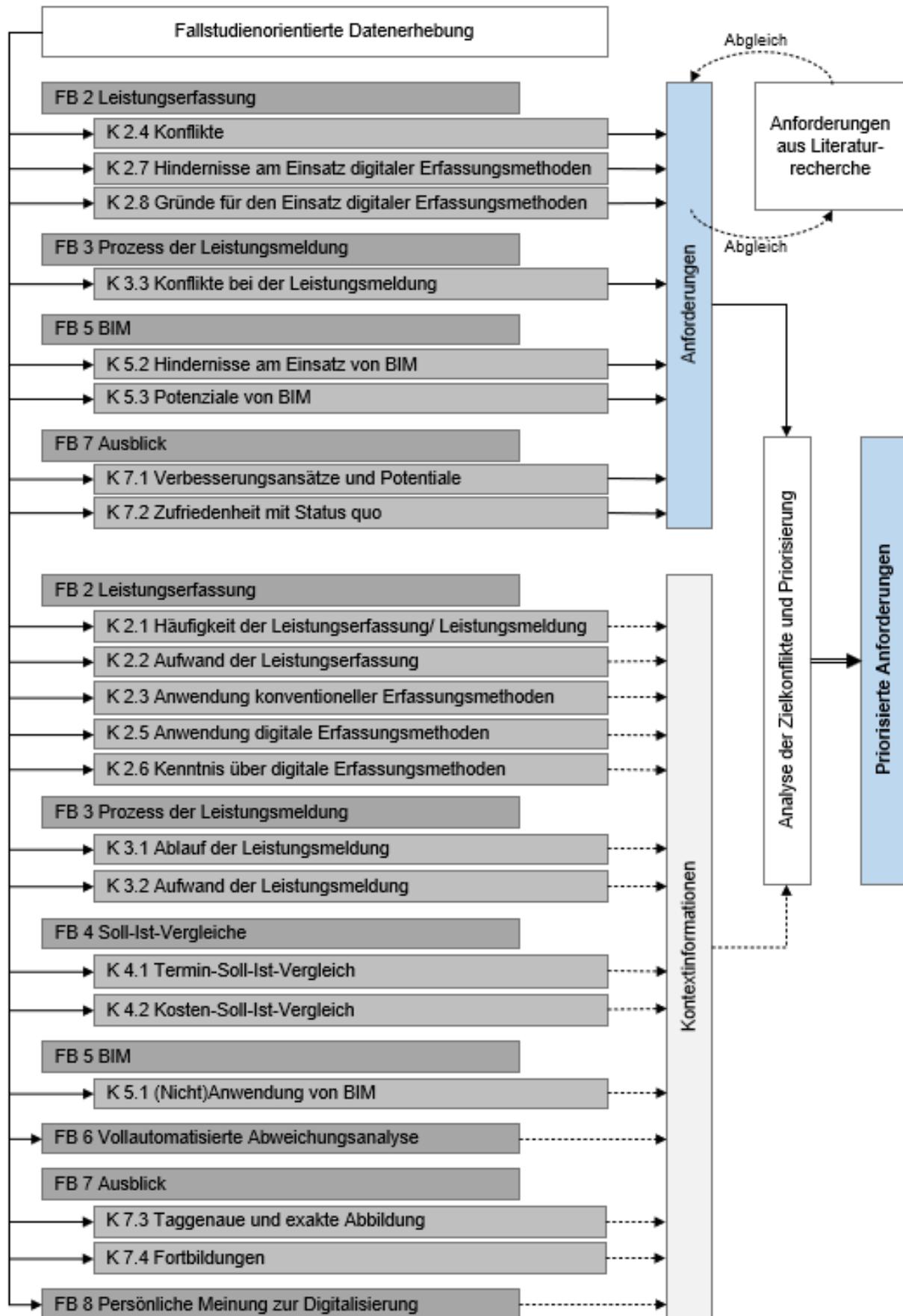


Abbildung 26: Verfahrensweise zur Priorisierung der Anforderungen

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an DIN EN ISO 9241-210:2020-03, 2020, S. 23; Tibes, 2019, S. 81; DAKKS, 2010, S. 12

Die aus der Studie erhobenen Anforderungen wurden im folgenden Schritt thematisch strukturiert (Abbildung 27) und mit den Ergebnissen der Literaturrecherche abgeglichen.

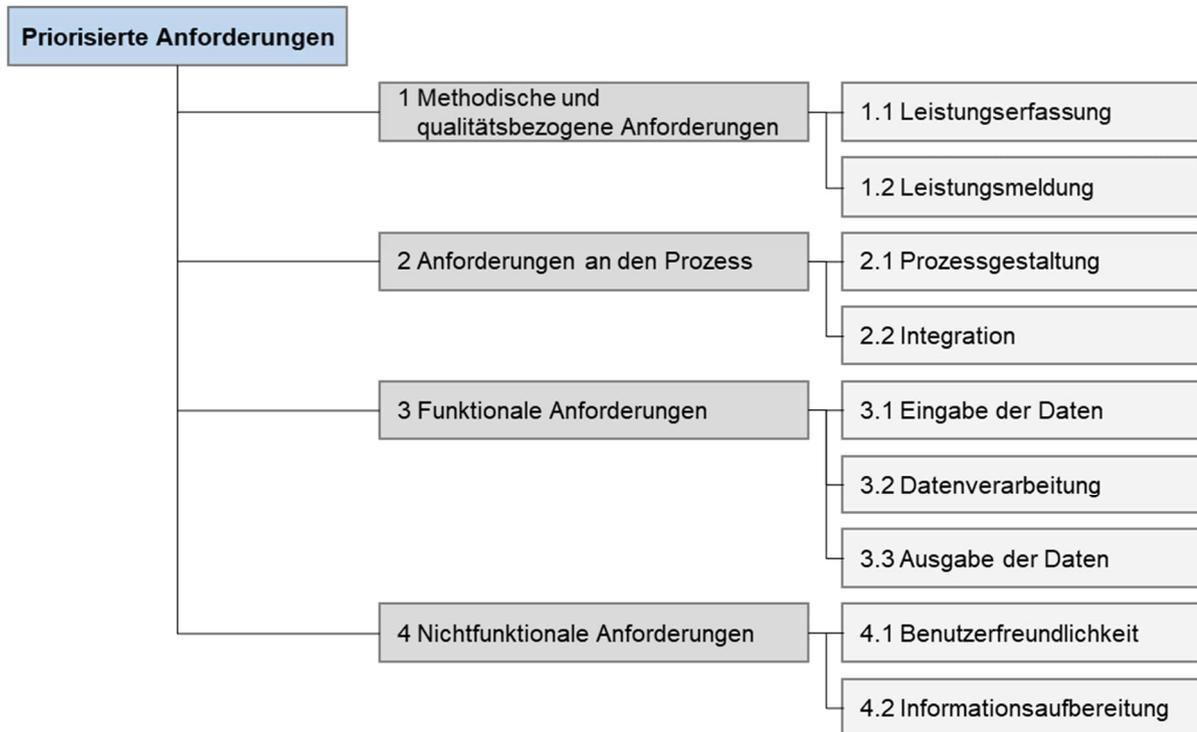


Abbildung 27: Strukturierung der Anforderungen

Unter den benannten Informationen erfolgte eine systematische Priorisierung der Anforderungen. Da nicht alle Anforderungen in dem zu entwickelnden Konzept vollumfänglich berücksichtigt werden können, ist eine Priorisierung erforderlich. Ziel des Priorisierungsprozesses ist die Erreichung einer hohen Gebrauchs- und Praxistauglichkeit des zu entwickelnden Konzeptes.

Benannte und abgeleitete Anforderungen müssen mit der Zielstellung der Arbeit sowie der zu erwartenden Datenqualität und -quantität abgeglichen werden. Ebenso sind diese auf Zielkonflikte der Abschnitte 3.2, 3.3 und 3.4 zu untersuchen. Bei vorliegenden Zielkonflikten war eine Berücksichtigung der Anforderung nur mit Abweichungen möglich (Priorität B) oder die Anforderung musste zurückgestellt werden (Priorität C). Die Priorisierung erfolgt in drei Stufen (Tabelle 4). Damit erfolgte in Anlehnung an Metzner und die MoSCoW-Methode die Priorisierung der Anforderungen in **Muss-**, **Sollte-** und **optionale Anforderungen**. (Vgl. Metzner, 2020, S. 64; Bittner und Spence, 2003, S. 100 f.)

Tabelle 4: Priorisierungsstufen der Anforderungen

Priorität	Beschreibung
A	Es <b>muss</b> die Anforderung mit geringen Abweichungen in dem zu entwickelnden Konzept umgesetzt werden.
B	Es <b>sollte</b> die Anforderung ggf. mit Abweichungen in dem zu entwickelnden Konzept umgesetzt werden.
C	Es wird die Anforderung des untersuchten Rahmens überschritten oder steht im Zielkonflikt zu anderen Anforderungen oder Kontextbedingungen. Diese wird für eine weiterführende Untersuchung und ggf. <b>optionale</b> Umsetzung zurückgestellt.

Die Anlage 6 – Anforderungsdatenbank enthält eine Übersicht, die die gesammelten Anforderungen der Daten- und Literaturerhebung darstellt. Ebenfalls können die Kurzbelege zu den aufgeführten Literaturquellen eingesehen werden.

## 4.2 Methodische und qualitätsbezogene Anforderungen

Methodische und qualitätsbezogene Anforderungen stellen erwünschte Eigenschaften an die angewandten Methoden dar. Die Anforderungen wurden in Leistungserfassung und Leistungsmeldung unterteilt. Aus der Kombination beider Anforderungsarten lassen sich die Anforderungen an die Bauleistungsfeststellung ableiten.

### 4.2.1 Leistungserfassung

Die Anforderungen an die Leistungserfassung lassen sich der nachfolgenden Tabelle 5 entnehmen. Es wurden insgesamt fünf Anforderungen erfasst.

Tabelle 5: Anforderungen an die Leistungserfassung

Nr.	Kurzbeschreibung	Priorität	Interview	Literatur
<b>1.1</b>	<b>Leistungserfassung</b>			
1.1.01	Kürzere Perioden der Leistungserfassung sind notwendig (1 x pro Monat ist nicht ausreichend).	A	✓	✓
1.1.02	Die Erfassung des Fertigstellungsgrades bedarf einer visuellen Bestätigung/Nachvollziehbarkeit der tatsächlich aufgenommenen Daten.	A	✓	✓
1.1.03	Leistungswerte sollen automatisiert übernommen werden.	B	✓	
1.1.04	Es sind korrekte und detailliert erfasste Leistungswerte erforderlich, keine Schätzungen.	A	✓	✓

1.1.05	Die Erfassung sollte objektiv und unabhängig vom Personal sein – es sollte kein Wissen durch Erfahrungswerte verloren gehen.	A	✓	
--------	--	---	---	--

Folgend werden die Anforderungen erläutert und in Bezug auf die Methodik und Qualitäten der Leistungserfassung priorisiert.

- zu 1.1.01 In der Literatur als auch in den durchgeführten Interviews wurden kürzere Perioden der Leistungserfassung gefordert. Dies deckt sich mit der vorab gesetzten Zielstellung der Arbeit und die Priorität wird daher auf A gesetzt.
- zu 1.1.02 In mehr als drei Kategorien haben die Befragten die Nachvollziehbarkeit der tatsächlich aufgenommenen Daten sowie des tatsächlich hergestellten Objektes und dessen visuelle Überprüfbarkeit gefordert. Dies gleicht ebenso Erfordernissen aus der Literatur. Die Priorität wird daher auf A gesetzt.
- zu 1.1.03 Als B-Priorität wurde die automatisierte Übergabe der Leistungswerte eingestuft. Diese dient einer Fehlerminimierung im Gesamtprozess und bestenfalls einer zeitlichen Optimierung. Eine Abgrenzung zu anderen Prozessen ist unklar und auch die softwarespezifische Datenübergabe ist unklar. Dies sollte untersucht werden.
- zu 1.1.04 Als Priorität A wird die korrekte und detaillierte Erfassung der Leistungswerte, Massen und Mengen aufgenommen. Die Befragten fordern ausdrücklich von Schätzmengen abzusehen. Dies wird aus den Subsumptionen von vier Kategorien identifiziert sowie in der Literatur gefordert.
- zu 1.1.05 Aufgrund des Erfordernisses, einer objektiven und nicht Personal-/ erfahrungsabhängigen Erfassung der Leistungswerte in den Subsumptionen von fünf Kategorien, wird die Priorität A determiniert.

#### 4.2.2 Leistungsmeldung

Zu Tabelle 6 sind die identifizierten Anforderungen bez. Methodik und Qualität der Leistungsmeldung zusammengefasst. Es wurden insgesamt zwölf Anforderungen erfasst.

**Tabelle 6: Anforderungen an die Leistungsmeldung**

Nr.	Kurzbeschreibung	Priorität	Interview	Literatur
<b>1.2</b>	<b>Leistungsmeldung</b>			
1.2.01	Die Leistungsmeldung hat direkt, ohne Zeitverlust, aufbauend zur Leistungserfassung zu erfolgen.	A	✓	✓
1.2.02	Die Auswertung sollte objektiv und unabhängig vom Personal sein – es darf kein Wissen verloren gehen.	A	✓	

1.2.03	Der Baufortschritt soll automatisiert und objektiv festgehalten sowie abgebildet und visualisiert werden.	A	✓	
1.2.04	Es muss eine gleichbleibende Qualität der Auswertung gewährleistet sein.	B	✓	
1.2.05	Die Auswertung muss nachvollziehbar und transparent aufbereitet sein.	A	✓	
1.2.06	Für die Ermittlung der Soll-Kosten müssen ein aktueller Bauablaufplan sowie eine aktuelle Arbeitskalkulation die Grundlage sein.	A	✓	✓
1.2.07	Tatsächliche Leistungsmengen/-werte sollen abgebildet und herangezogen werden.	A	✓	✓
1.2.08	Die Bewertung von Abgrenzungen muss fundiert sein.	C	✓	
1.2.09	Der terminliche Soll-Ist-Vergleich muss im Zuge des Leistungsmeldungsprozesses erfolgen.	B	✓	✓
1.2.10	Der terminliche Soll-Ist-Vergleich muss in Korrelation der Soll-Kosten erfolgen.	B	✓	✓
1.2.11	Es soll eine Betrachtung der Entwicklung der Maßnahme zu Bauende erfolgen.	B	✓	✓
1.2.12	Der Prozess des Kosten-Soll-Ist-Vergleichs soll zeiteffizienter sein.	B	✓	

Im Folgenden findet eine Erläuterung der Anforderung und deren Priorisierung in Bezug auf die Methodik und Qualitäten der Leistungsmeldung statt.

- zu 1.2.01 In der Literatur als auch in den durchgeführten Interviews wurden kürzere Perioden der Leistungsmeldung gefordert. Ebenso sollen diese ohne großen zeitlichen Verlust im Nachgang der Leistungserfassung erfolgen. Dies deckt sich mit der gesetzten Zielstellung der Arbeit. Die Priorität wird daher auf A gesetzt.
- zu 1.2.02 Die Auswertung der Leistungswerte soll objektiv und nicht durch menschliche Einschätzungen und Entscheidungen beeinflusst werden. Aufgrund der in Zusammenhang stehenden Anforderung 1.1.05 wird die Priorität A fixiert.
- zu 1.2.03 In den Subsumtionen von mehr als fünf Kategorien haben die Befragten das Kriterium der Abbildung eines objektiv festgehaltenen Baufortschrittes verlangt, welcher mit der Leistungsmeldung visualisiert wird. Aufgrund dessen und weil die vorliegende Anforderung in Korrelation der Anforderungen 1.1.02 sowie 1.1.03 steht, wird die Priorität A herangezogen.
- zu 1.2.04 Aus den Zusammenfassungen von zwei Kategorien geht als Kriterium eine einheitliche Qualität der Auswertung hervor und diese ist mittels eines Standardprozesses zu gewährleisten. Inwiefern ein Standardprozess für die

- diversen Anforderungen des vorliegenden Untersuchungsgegenstandes abbildbar ist, muss genauer untersucht werden. Die Priorität wurde daher auf B gesetzt.
- zu 1.2.05 Es wird eine transparente und nachvollziehbare Auswertung der Leistungswerte von den Befragten gefordert. Dies steht in engem Zusammenhang der Anforderung 1.1.02 und wird daher der Priorität A zugeordnet.
- zu 1.2.06 Eine reale Leistung basiert nicht auf den Rechnungsmengen gegenüber dem Auftraggeber (AG); daher sind die tatsächlichen Leistungswerte/-mengen heranzuziehen. Aus diesem Grund und dem gleichen Erfordernis aus der Literatur wird die Priorität A vergeben.
- zu 1.2.07 Priorität A wurde aufgrund der Übereinstimmung der Interviews und der in der Literatur angegebenen Forderungen gewählt. Es ist von Bedeutung, tatsächliche Leistungswerte und Rechnungswerte voneinander getrennt zu betrachten. Diese können übereinstimmen, aber auch Differenzen enthalten.
- zu 1.2.08 Unklar ist die Abgrenzung zu anderen Prozessen und die im Zielkonflikt stehende subjektive Einschätzung der benannten Abgrenzungen. Festgehalten wurde diese Anforderung einmal. Es wird die Priorität C determiniert.
- zu 1.2.09 Die Anforderung eines Soll-Ist-Vergleichs der Bauzeit im Zuge des Leistungsmeldungsprozesses wird als sinnvoll erachtet und wurde in einer Subsumption identifiziert. Die Anforderung wird ebenso in der Literatur verlangt aufgrund dessen die Einstufung der Priorität B erfolgt.
- zu 1.2.10 Die Anforderung eines Soll-Ist-Vergleichs der Bauzeit in Korrelation der Soll-Kosten wird als sinnvoll erachtet und wurde einmal identifiziert. Die Einstufung erfolgt in Priorität B.
- zu 1.2.11 In einer Subsumption wird die Betrachtung der Entwicklung der Baumaßnahme zu Bauende gefordert und dies in der Leistungsmeldung zu integrieren. Aufgrund dessen wird die Priorität B vergeben.
- zu 1.2.12 Unklar ist die Abgrenzung zu anderen Prozessen im Zuge der Zielstellung der Arbeit. Es besteht ein möglicher Zielkonflikt zum Untersuchungsrahmen der Arbeit. Da die Anforderung eines zeiteffizienten Kosten-Soll-Ist-Vergleichs im Zuge der Leistungsmeldung in einer Subsumption identifiziert wurde, wird die Priorität B festgelegt.

### **4.3 Anforderungen an den Prozess**

Die Anforderungen an den Prozess beschreiben, wie die Prozesse der Bauleistungsfeststellung aus Sicht der Befragten gestaltet werden sollen und auf welche Weise diese mit anderen Geschäftsprozessen zu integrieren sind.

#### **4.3.1 Prozessgestaltung**

Die Anforderungen an die Prozessgestaltung lassen sich der nachfolgenden Tabelle 7 entnehmen. Es wurden insgesamt 14 Anforderungen erfasst. Die Befragten fordern einen zeitoptimierenden Prozess, indem Schnittstellenprobleme menschlicher sowie IT-technischer

Natur behoben sind. Dieser soll als Standardprozess ausgebildet sein und je nach Erfordernis für die spezifische Aufgabe anpassbar. Ergebnisse sollen objektiv dargestellt und erfasst werden – der Mensch selbst gibt diese jedoch frei und er ist die letzte Prüfinstanz.

Tabelle 7: Anforderung an die Prozessgestaltung

Nr.	Kurzbeschreibung	Priorität	Interview	Literatur
2.1	<b>Prozessgestaltung</b>			
2.1.01	Die Aufnahme von korrekten und detaillierten Leistungswerten soll zeiteffizienter sein.	B	✓	
2.1.02	Es wird eine Prozessoptimierung von der Aufnahme der Daten bis zur Auswertung gefordert.	A	✓	
2.1.03	Der Prozess der Auswertung des Fertigstellungsgrades soll zeiteffizienter erfolgen.	A	✓	
2.1.04	Soll-Daten müssen von Auftraggebern bereitgestellt werden.	C	✓	
2.1.05	Schnittstellenprobleme durch menschliche Interaktionen sollen ausgeschlossen werden.	B	✓	✓
2.1.06	Der Prozess von der Aufnahme bis zur Darstellung des Ergebnisses muss objektiver (nicht personenabhängig) und prüfbar sein.	A	✓	
2.1.07	Der Prozess sollte ohne Stichtagsbezug realisierbar sein.	C	✓	
2.1.08	Gewonnene Erkenntnisse sollten in Nachfolgeprojekte einfließen.	C	✓	✓
2.1.09	Zeit- und Personalaufwand muss durch standardisierte Prozesse reduziert werden und eine Erleichterung und Zeitersparnis für alle Beteiligten innehaben.	A	✓	
2.1.10	Die Standardisierung des Prozesses soll für diverse Unternehmensgrößen gelten.	B	✓	
2.1.11	Ein durchgängig digitaler Gesamtprozess sollte implementiert werden.	B	✓	
2.1.12	Das Konfliktpotenzial durch subjektive Einschätzungen soll reduziert werden.	C	✓	
2.1.13	Die letzte Prüfinstanz sollte der Mensch sein.	B	✓	
2.1.14	Ziel ist die Automatisierung des Prozesses zur Minimierung von redundanten Arbeitsabläufen.	A	✓	

Folgend werden die Anforderungen und deren Priorisierung in Bezug auf die Prozessgestaltung erläutert.

- zu 2.1.01 Unklar ist die Abgrenzung zum Detaillierungsgrad der Leistungswerte, da dieser von den Interviewten unterschiedlich ausgelegt wird. Aufgrund dessen und weil diese Anforderung allein in einer Subsumption identifiziert wurde, wird die Priorität B festgelegt.
- zu 2.1.02 Der Gesamtprozess von der Aufnahme bis zur Auswertung der Daten soll unter den benannten Qualitätsanforderungen optimiert werden. Es wird die Priorität A determiniert, die die Anforderung in fünf Zusammenfassungen der Kategorien bestätigt sowie mit vier weiteren Anforderungen in Korrelation steht (1.1.01, 1.1.03, 1.2.01 und 2.1.01).
- zu 2.1.03 Der Prozess der Auswertung des Fertigstellungsgrades wird zeiteffizienter von den Befragten gefordert. Diese Anforderung konnte in drei Subsumptionen festgehalten werden und steht mit den Anforderungen 1.1.01, 1.1.03, 1.2.01, 2.1.01 und 2.2.02 in Korrelation, daher wird die Priorität A vergeben.
- zu 2.1.04 Die Kopplung mit den AG ist sinnvoll, jedoch nicht die primäre Zielstellung der Untersuchung – daher wird die Priorität auf C determiniert.
- zu 2.1.05 Wünschenswert ist es, Schnittstellenprobleme durch menschliche Interaktionen durch Automatisierung auszuschließen. Diese Anforderung wird in einer Subsumption identifiziert und steht in Zusammenhang mit den Anforderungen 1.1.03 und 1.2.03. weshalb die Priorität B vergeben wird.
- zu 2.1.06 Die Priorität A wird aufgrund des starken Zusammenhangs mit den Anforderungen 1.1.05, 1.2.02, 1.2.03 und 1.2.04 determiniert. Objektive Ergebnisse für die Abbildung einer gleichbleibenden Qualität können nur durch einen objektiven Prozess gewährleistet werden.
- zu 2.1.07 Ein Gesamtprozess ohne Stichtagsbezug bedarf einer vollautomatischen Echtzeitdokumentation der Leistung. Dies steht im Zielkonflikt der Abgrenzung der vorliegenden Arbeit, daher wird die Priorität C fixiert.
- zu 2.1.08 Die vorliegende Anforderung wird mit C priorisiert. Die Anforderung, gewonnene Erkenntnisse in einem wissensbasierten System abzubilden ist ein aufbauender Schritt zur vorliegenden Arbeit und liegt außerhalb des Untersuchungsgegenstandes.
- zu 2.1.09 Die Entwicklung eines standardisierten Prozesses muss die Reduzierung des Zeit- und Personalaufwandes beinhalten. Diese Anforderung wird mit A priorisiert aufgrund der Identifizierung in zwei Subsumptionen und der in Korrelation stehen Anforderungen 1.1.01, 1.1.03, 1.2.12, 2.1.01, 2.1.02 und 2.1.03.
- zu 2.1.10 Die Priorität B wird für die Entwicklung eines Standardprozesses determiniert, welcher für diverse Unternehmensgrößen anwendbar ist. Diese Anforderung steht in Korrelation der nachfolgenden Anforderung 2.1.11.

- zu 2.1.11 Auch hier wird Priorität B festgehalten. Die Anforderung steht direkt in Zusammenhang mit der zuvor beschriebenen 2.1.10 und wird in zwei Subsumptionen gefordert. Der Gesamtprozess ist entsprechend zu gliedern, dass dieser branchenspezifisch anpassbar ist.
- zu 2.1.12 Ziel der vorliegenden Arbeit sind möglichst objektive Ergebnisse durch einen neu zu integrierenden Prozess. Die Konfliktvermeidung durch diese Entwicklung steht nicht primär im Fokus der vorliegenden Untersuchung und wird daher mit der Priorität C versehen.
- zu 2.1.13 Aufgrund der Tatsache, dass niemals von einem komplett fehlerfreien Prozess ausgegangen werden kann, ist es sinnvoll, die letzte Freigabe der erfassten Daten durch eine geeignete Person zu steuern. Aufgrund der Identifizierung in einer Subsumption wird die Anforderung der Priorität B unterzogen.
- zu 2.1.14 Der Erfolg neuer Prozesse ist nur gegeben, wenn eine Verbesserung gegenüber den herkömmlichen Methoden und Prozessen erreicht wird, daher ist diese Anforderung mit der Priorität A determiniert.

#### 4.3.2 Prozessintegration

Anforderungen an die Prozessintegration lassen sich der nachfolgenden Tabelle 8 entnehmen. Es wurde betont, dass ein optimierter Prozess zur Bauleistungsfeststellung mittels digitaler Anwendungen in die bestehenden Bauprozesse zu integrieren ist. Konkret wurde die Integration einer digitalen Bauleistungsfeststellung in die Abläufe des Baustellencontrollings als zweckmäßig erachtet. Insgesamt wurden sechs Anforderungen identifiziert.

Tabelle 8: Anforderung an die Prozessintegration

Nr.	Kurzbeschreibung	Priorität	Interview	Literatur
<b>2.2</b>	<b>Prozessintegration</b>			
2.2.01	Der digitale Prozess soll als Standard in die bestehenden Arbeitsprozesse integriert werden.	A	✓	✓
2.2.02	Die Einbindung der Leistungen von Nachunternehmern muss gewährleistet sein.	A	✓	
2.2.03	Die Anpassung der digitalen Systeme zur Integration in den Bauprozess muss erfolgen.	B	✓	
2.2.04	Der zu entwickelnde Prozess der Bauleistungsfeststellung soll in die BIM-Methodik integrierbar sein.	A	✓	
2.2.05	Die Möglichkeit der tagesaktuellen und exakten Abbildung des IST-Standes der Baustelle sollte gewährleistet sein.	B	✓	
2.2.06	IT-Schnittstellen müssen im Prozess berücksichtigt und integriert sein.	B	✓	✓

Eine Erläuterung der Anforderung und deren Priorisierung in Bezug auf die Prozessintegration findet nachfolgend statt.

- zu 2.2.01 Die Integration eines digitalen Prozesses des Fertigstellungsgrades zur Auswertung der Bauleistungsfeststellung wird als erforderlich erachtet und mit Priorität A bewertet. Dies ist in zwei Subsumptionen sowie in der Literatur identifiziert worden, da es sowohl Effizienzvorteile bringt, welche im Zusammenhang mit den Anforderungen 1.1.01, 1.2.12, 2.1.01, 2.1.02, 2.1.03 und 2.1.09 stehen, als auch die Datenqualität dadurch positiv beeinflusst werden kann (Anforderungen 1.1.04, 1.1.05, 1.2.03 und 1.2.04).
- zu 2.2.02 Für die Bauleistungsfeststellung eines Projektes ist die Ermittlung von Nachunternehmerleistungen unerlässlich. Aus diesem Grund wird die Priorität A festgehalten. Die Anforderung wurde in einer Subsumption identifiziert.
- zu 2.2.03 Es wird als sinnvoll erachtet ein digitales System zur Bauleistungsfeststellung in den Bauprozess zu integrieren und nicht den Bauprozess an ein System anzupassen. Inwiefern dies gewährleistet werden kann, muss untersucht werden und wird mit der Priorität B bewertet. Die Anforderung wurde in zwei Zusammenfassungen der Kategorien identifiziert.
- zu 2.2.04 Die Integration des Prozesses zur Bauleistungsfeststellung in die Anwendung der BIM-Methodik wird als unerlässlich erachtet und mit der Priorität A festgeschrieben.
- zu 2.2.05 In der Bauleistungsfeststellung wird es als sinnvoll erachtet, die Möglichkeit einer tagesaktuellen und exakten Abbildung des Ist-Standes eines Projektes abzubilden und im Prozess integrieren zu können. Die Priorität wird auf B eingestuft, da dies in nur einer Subsumption identifiziert werden konnte und untersucht werden muss, inwiefern dies im Rahmen der vorliegenden Forschung integrierbar ist.
- zu 2.2.06 Auf Basis der einmaligen Identifizierung dieser Anforderung in den Subsumptionen und der Überprüfung, ob IT-Schnittstellen für die Grundgesamtheit eines Prozesses integriert werden können, wird die Priorität B veranschlagt.

## 4.4 Funktionale Anforderungen

Nutzungsanforderungen werden aus den Erfordernissen und Fähigkeiten der Benutzer abgeleitet. Bezug nehmend auf die Softwaretechnik beschreiben funktionale Anforderungen gewünschte Funktionen des zu konzeptionierenden IT-gestützten Werkzeuges. (Vgl. DIN EN ISO 9241-210:2020-03, 2020, S. 12 ff.) Die Unterteilung erfolgte in die Kategorien Eingabe der Daten, Datenverarbeitung und Ausgabe der Daten.

### 4.4.1 Eingabe der Daten

Die Anforderungen zur Eingabe der Daten lassen sich der nachstehenden Tabelle 9 entnehmen. Die funktionalen Anforderungen beschreiben, welche Funktionen und Eigenschaften zur Eingabe bzw. zur Erfassung der Daten erforderlich sind.

Tabelle 9: Anforderung an die Eingabe der Daten

Nr.	Kurzbeschreibung	Priorität	Interview	Literatur
<b>3.1</b>	<b>Eingabe der Daten</b>			
3.1.01	Die Eingabe der notwendigen Daten muss zeitlich effizienter werden.	B	✓	
3.1.02	Es muss eine objektorientierte Erfassung bzw. Zuordnung gewährleistet sein.	A	✓	

Folgend findet eine Erläuterung der Anforderung und deren Priorisierung in Bezug auf die Eingabe und Erfassung der Daten statt.

zu 3.1.01 Eine zeiteffiziente Eingabe der Daten, bestenfalls eine automatisierte Übergabe, wird als sinnvoll erachtet. Es muss untersucht werden, inwiefern dies im Untersuchungskontext abbildbar ist. Die Anforderung steht in Korrelation folgender Anforderungen (1.1.03, 1.2.01 und 2.1.02.) und wurde in einer Subsumption identifiziert, weshalb die Priorität B vergeben wurde.

zu 3.1.02 Priorität A wurde für eine objektorientierte Erfassung bzw. Zuordnung vergeben. Dies ist ein unerlässlicher Fakt, der in Verbindung der Anforderungen 1.1.02, 2.2.04 und 3.2.01 steht.

#### 4.4.2 Datenverarbeitung

Unter den funktionalen Anforderungen der Datenverarbeitung wird aufgeführt, auf welche Weise das System mit den erfassten Daten umgehen soll und wie diese verarbeitet, übergeben und aufbereitet werden sollen (Tabelle 10).

Tabelle 10: Anforderungen an die Datenverarbeitung

Nr.	Kurzbeschreibung	Priorität	Interview	Literatur
<b>3.2</b>	<b>Datenverarbeitung</b>			
3.2.01	Erfasste Daten müssen rückführbar in ein Modell entsprechend der BIM-Methodik sein, um die Auswertung mit Soll-Daten vergleichen zu können.	A	✓	✓
3.2.02	Einheitliche Datenübergabe per funktionierenden Schnittstellen sind erforderlich.	C	✓	
3.2.03	Erzeugte Datenmengen müssen unter Baustellenbedingungen und in der regulären Arbeitszeit verarbeitbar sein – ein zeitlicher Mehrwert soll erreicht werden.	C	✓	

3.2.04	Eine direkte Verbindung der optischen Auswertung zu Leistungswerten ist erforderlich.	A	✓	
3.2.05	Die Aufbereitung der Daten und Aktualisierung des Modells soll zeiteffizienter sein.	A	✓	✓
3.2.06	Die Anwendung muss für mehrere Bereiche anwendbar und nutzbringend sein.	C	✓	
3.2.07	Die Übermittlung der Daten sollte bestenfalls in Echtzeit erfolgen.	B	✓	✓

Eine Erläuterung der Anforderung und deren Priorisierung in Bezug auf die Datenverarbeitung findet nachfolgend statt.

- zu 3.2.01 Die Rückführbarkeit bzw. Integration der Daten in ein Modell entsprechend BIM-Methodik ist eine unerlässliche Anforderung, welche in einer Subsumption gefordert wird sowie im Zusammenhang der Anforderungen 1.1.02, 1.2.03, 2.2.04 und 3.1.02 steht.
- zu 3.2.02 Eine Datenübergabe per funktionierenden Schnittstellen wird als sinnvoll erachtet. In einem standardisierten Prozess kann dies jedoch nicht für die Grundgesamtheit gewährleistet werden, da dies in Abhängigkeit der eingesetzten Systeme steht. Die Priorität wird daher mit C determiniert.
- zu 3.2.03 Die performante Verarbeitung der Daten obliegt den eingesetzten Systemen. Es ist zu untersuchen, inwiefern dies im Zusammenhang des Untersuchungskontexts umsetzbar ist. Aufgrund dessen und der allein zweimaligen Identifizierung in den Zusammenfassungen wird dies mit Priorität C bewertet.
- zu 3.2.04 Die Anforderung einer direkten Verbindung der Leistungswerte zur optischen Auswertung wird mit der Priorität A versehen. Dies wurde in drei Subsumptionen gefordert und steht in Verbindung der Anforderungen 1.1.02, 1.2.03, 1.2.05, 2.2.04, 2.2.06, 3.1.02 und 3.2.01.
- zu 3.2.05 Es ist sinnvoll, die Aktualisierung und Aufbereitung der Daten zeiteffizienter zu gestalten. 1.1.01, 1.2.04, 1.2.05, 1.2.06, 2.1.01, 2.1.03, 2.2.03, 2.2.04 und 2.2.05 stehen in Korrelation der vorliegenden Anforderung. Auf Basis dessen und der aufgezeigten funktionalen Anforderung in zwei Subsumptionen wird die Priorität A determiniert.
- zu 3.2.06 Es ist sinnvoll, mit einer Anwendung mehrere Anwendungsbereiche und Erfordernisse abzudecken. Dies steht im Zielkonflikt der vorliegenden Untersuchung und wird deshalb mit der Priorität C bewertet.
- zu 3.2.07 In der Literatur als auch in den durchgeführten Interviews wurde eine schnelle Übermittlung der Daten, bestenfalls in Echtzeit, gefordert. Aufgrund der Systemabhängigkeiten, die diesbezüglich untersucht werden müssen, wird Priorität B festgehalten. Die Anforderung steht in Verbindung mit 1.1.01, 1.2.01, 2.1.02, 2.1.03, 2.1.09, 2.1.14 und 2.2.05.

### 4.4.3 Ausgabe der Daten

Die funktionalen Anforderungen zur Ausgabe der Daten lassen sich der nachfolgenden Tabelle 11 entnehmen. Die Befragten äußerten zwei konkrete Vorstellungen hinsichtlich der durch das System auszugebenden Daten.

Tabelle 11: Anforderungen an die Ausgabe der Daten

Nr.	Kurzbeschreibung	Priorität	Interview	Literatur
<b>3.3</b>	<b>Ausgabe der Daten</b>			
3.3.01	Eine einheitliche Datenauswertung und -ausgabe ist erforderlich.	A	✓	
3.3.02	Die Auswertung der Daten und deren Ausgabe soll modellbasiert erfolgen.	A	✓	

Folgend findet eine Erläuterung der Anforderung und deren Priorisierung in Bezug auf die Ausgabe der Daten statt.

- zu 3.3.01 Für eine gleichbleibende hohe Qualität ist eine einheitliche Ausgabe der Daten unerlässlich. Dies steht in Korrelation der Anforderung 1.2.02, 1.2.04, 1.2.05 und wird infolgedessen mit A priorisiert.
- zu 3.3.02 Mit fortschreitender Anwendung der BIM-Methodik ist eine modellbasierte Ausgabe unerlässlich. Die Anforderung steht in direkter Verbindung der Anforderungen 2.2.04, 3.1.02, 3.2.01 und wird durch zwei Subsumptionen identifiziert. Priorität A wird infolgedessen vorgesehen.

## 4.5 Nichtfunktionale Anforderungen

Nichtfunktionale Anforderungen beschreiben, auf welche Art und Weise das System die Funktionen erbringen sollte. Im Gegensatz dazu beschreiben funktionale Anforderungen, welche Funktionen es geben sollte. (Vgl. Metzner, 2020, S. 64 f.) Für den vorliegenden Untersuchungsgegenstand wurde dies in die Kategorien Benutzerfreundlichkeit (Abschnitt 4.5.1, S. 97) und Informationsaufbereitung (Abschnitt 4.5.2) unterschieden.

### 4.5.1 Benutzerfreundlichkeit

Die nachstehende Tabelle 12 beschreibt die nichtfunktionalen Anforderungen der Befragten hinsichtlich Benutzerfreundlichkeit. So waren für die Befragten eine intuitive Gestaltung des Systems und gute Umsetzbarkeit des Prozesses und dessen einfache Handhabbarkeit ausschlaggebende Kriterien.

Tabelle 12: Anforderungen an die Benutzerfreundlichkeit

Nr.	Kurzbeschreibung	Priorität	Interview	Literatur
<b>4.1</b>	<b>Benutzerfreundlichkeit</b>			
4.1.01	Störfaktoren sollen durch praktikable einfache Bedienung minimiert werden.	A	✓	
4.1.02	Das System soll intuitiv gestaltet sein.	A	✓	

Eine Erläuterung der nichtfunktionalen Anforderung und deren Priorisierung in Bezug auf die Benutzerfreundlichkeit findet nachfolgend statt.

zu 4.1.01 Diese Anforderung hat angesichts aller bisher beschriebenen Anforderungen aus methodischen und qualitätsbezogenen Anforderungen, Anforderungen an den Prozess und funktionalen Anforderungen, eine hohe Bedeutung für die Akzeptanz entsprechender Prozesse und Werkzeuge. Daher wird Priorität A determiniert.

zu 4.1.02 Analog der zuvor beschriebenen Erläuterung wird Priorität A festgesetzt. Hinzu kommt die Identifizierung dieser Anforderung in drei Subsumptionen, welche die gewählte Priorität bekräftigen.

#### 4.5.2 Informationsaufbereitung

Die nichtfunktionalen Anforderungen der Informationsaufbereitung lassen sich der Tabelle 13 entnehmen. Wichtig ist den Befragten sowohl die intuitive Gestaltung des Systems, die schnelle Erfassbarkeit sowie die visuelle Aufbereitung der Daten.

Tabelle 13: Anforderungen an die Informationsaufbereitung

Nr.	Kurzbeschreibung	Priorität	Interview	Literatur
<b>4.2</b>	<b>Informationsaufbereitung</b>			
4.2.01	Eine einheitliche Informationsaufbereitung ist erforderlich.	A	✓	✓
4.2.02	Schnelles Erkennen und visuelles Aufzeigen der Entwicklungen sind für eine schnelle Fehleridentifizierung erforderlich.	A	✓	✓
4.2.03	Es bedarf einer kompakten, strukturierten Informationsaufbereitung.	A	✓	
4.2.04	Die Prägnanz der erforderlichen Informationen sollte beachtet werden.	A	✓	

Eine Erläuterung der nichtfunktionalen Anforderungen und deren Priorisierung in Bezug auf die Informationsaufbereitung findet nachfolgend statt.

- zu 4.2.01 Angesichts aller bisher beschriebenen Anforderungen aus methodischen und qualitätsbezogenen Anforderungen, Anforderungen an den Prozess und funktionalen Anforderungen hat eine einheitliche Informationsaufbereitung eine hohe Bedeutung für die Akzeptanz entsprechender Prozesse und Werkzeuge. Daher wird Priorität A determiniert. Bekräftigt wird dies durch zwei Subsumptionen und der angegebenen Literatur, in denen die vorliegende Anforderung identifiziert wurde.
- zu 4.2.02 Diese Anforderung hat angesichts aller bisher beschriebenen Anforderungen aus methodischen und qualitätsbezogenen Anforderungen, Anforderungen an den Prozess und funktionalen Anforderungen eine hohe Bedeutung für die Akzeptanz entsprechender Prozesse und Werkzeuge. Aus diesem Grund und wegen der identifizierten Anforderung in den Subsumptionen sowie des Literaturnachweises wird Priorität A determiniert. Das schnelle Erfassen der grundlegenden Informationen und der visuellen Aufbereitung wird als ein großer Mehrwert betrachtet.
- zu 4.2.03 Analog der zuvor beschriebenen Erläuterung sowie in zwei identifizierten Subsumptionen wird Priorität A festgesetzt. Informationen müssen strukturiert, aufbereitet und in kompakter Form dargestellt werden.
- zu 4.2.04 Vergleichbar mit der zu 4.2.01 und 4.2.02 beschriebenen Erläuterung sowie zwei identifizierten Subsumptionen wird Priorität A festgesetzt. Die Prägnanz und Kompaktheit der Informationen müssen im zu entwickelnden Prozess und System beachtet werden.

## 4.6 Quantitative Auswertung

Eine quantitative Auswertung der Priorisierung der Anforderungen anhand der Themenfelder ist der nachstehenden Tabelle 14 zu entnehmen.

**Tabelle 14: Quantitative Auswertung der priorisierten Anforderungen**

Kategorie	(1) Methodische und qualitätsbezogene Anforderungen	(2) Anforderungen an den Prozess	(3) Funktionale Anforderungen	(4) Nicht-funktionale Anforderungen	Gesamt
A = Muss	10	8	6	6	30
B = Sollte	6	8	2	0	16
C = Optional	1	4	3	0	8
<b>Summe Anforderungen</b>	<b>17</b>	<b>20</b>	<b>11</b>	<b>6</b>	<b>54</b>

Abbildung 28 zeigt die prozentuale Verteilung der Priorisierung nach Themenfeldern. Priorität A (die Anforderung muss umgesetzt werden) geht zu 56 %, die Priorität B (die Anforderung sollte umgesetzt werden) zu 31 % in die vorgenommenen Priorisierungen ein. Die übrigen

13 % wurden aufgrund von Zielkonflikten oder Restriktionen des Kontexts mit der Priorität C (ggf. optionale Umsetzung) kategorisiert.

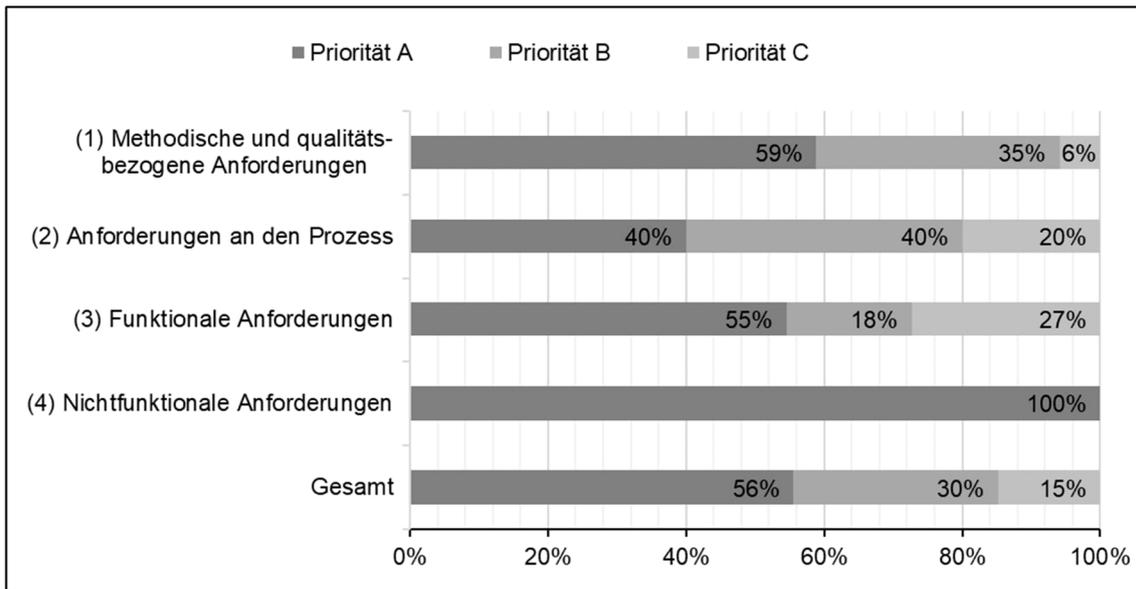
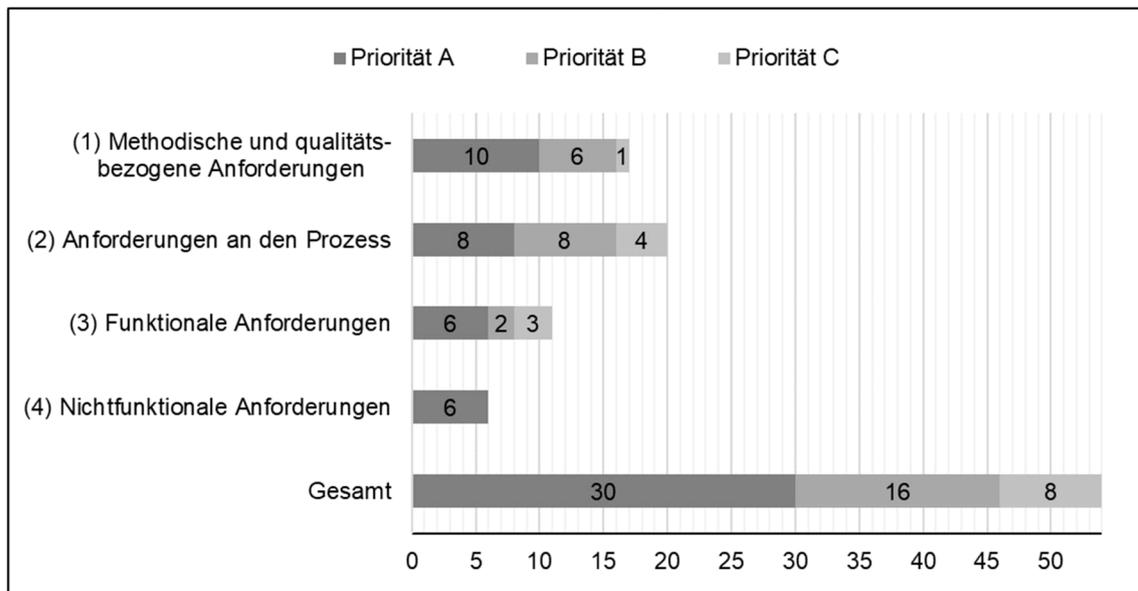


Abbildung 28: Prozentuale Verteilung der Priorisierung nach Themenfeldern

Insbesondere bei den methodischen und qualitätsbezogenen Anforderungen (Abschnitt 4.2.1, und 4.2.2) sowie den funktionalen Anforderungen (Abschnitt 4.4.1 bis 4.4.3) zeigt sich ein Anteil von über 50 % der Priorität A und dies spiegelt die hohe Bedeutung dieser Anforderungen wider. Nichtfunktionale Anforderungen (Abschnitt 4.5.1 und 4.5.2) gehen zu 100 % mit der Priorität A in das zu entwickelnde Konzept ein. Hieran zeigt sich, dass die „weichen“ Anforderungen bspw. kompakte Informationsaufbereitung, schnelles Erkennen und visuelles Aufzeigen der Baustellenentwicklung einen hohen Stellenwert innehaben. Die Anforderungen an den Prozess (Abschnitt 4.3.1 und 4.3.2) sind in der Priorität A und B gleich verteilt. Dies lässt sich auf die Gegebenheit zurückführen, dass die Anforderungen an den Prozess oft individuell für die Unternehmen sind und untersucht werden muss, wie diese in einen standardisierten unternehmensübergreifenden Prozess eingebunden werden können.

Für eine differenzierte quantitative Betrachtung ist die Auswertung ebenso in absoluten Werten heranzuziehen (Abbildung 29). Hier ist bspw. zu erkennen, dass die nichtfunktionalen Anforderungen zwar alle der Priorität A zugeordnet sind, jedoch mit dem geringsten Wert (sechs) an Anforderungen der Priorität A eingehen. Ebenso wurden mit die wenigsten Anforderungen in der Kategorie *Nichtfunktionale Anforderungen* identifiziert.



**Abbildung 29: Absolute Verteilung der Priorisierung nach Themenfeldern**

Aus den Interviews sowie der Literaturrecherche wurden die erhobenen Anforderungen gemeinsam zusammengeführt und thematisch gegliedert (Anlage 6). Anhand der gewonnenen Erkenntnisse zu den Rahmenbedingungen aus Kapitel 2 und Kapitel 3 erfolgte eine Priorisierung in drei Kategorien. Die priorisierten Anforderungen sind der erste Teilschritt zur Beantwortung der zentralen Forschungsfragestellung, wie ein Konzept zur automatisierten Leistungsfeststellung für die gewählte Zielgruppe zweckmäßig und bedarfsgerecht gestaltet werden muss. Damit sind alle Anforderungen herausgearbeitet, die in das Lösungskonzept einfließen sollen.

## 5 Lösungsmodell zur Optimierung der Bauleistungsfeststellung

### 5.1 Lösungsansatz

Basierend auf den herausgearbeiteten Anforderungen (Kapitel 4) stellt das Lösungskonzept den nächsten Schritt zur Klärung der zentralen Forschungsfrage dar: Nach der zweckmäßigen und bedarfsgerechten Gestaltung einer automatisierten Leistungsfeststellung für die gewählte Zielgruppe.

Die hier entwickelte automatisierte Leistungsfeststellung soll nun die Prozesse in geeigneter Weise kombinieren. Dabei ist das übergeordnete Ziel die Erhöhung der Effizienz und Effektivität der Bauleistungsfeststellung durch die Anwender und deren Unterstützer mittels einem teilautomatisierten integrierten Prozess. Erste Handlungsempfehlungen zu einem besseren Prozessmodell lassen sich bereits in Walther et al. finden. Hierin wird ein Gesamtüberblick für die Bauindustrie gegeben und eine Orientierung, welche Anwendung in welcher Projektphase mehr Effizienz versprechen. (Vgl. Walther et al., 2020, S. 526 ff.)

Der Lösungsansatz stellt hierbei keine Stand-alone-Lösung dar, sondern ist gemäß der Zielsetzung der Arbeit in die Arbeitsprozesse integriert. Zur Umsetzung dieser Anforderung muss das Gesamtsystem betrachtet werden, um einen gebrauchstauglichen Prozess umzusetzen.

Zum besseren Verständnis wird in den folgenden Abschnitten kurz auf die Gegebenheiten der Systemtheorie und auf deren Sachverhalte im Kontext des Lösungsansatzes eingegangen. Zugleich erfolgt in den Abschnitten 5.2 bis 5.5 die direkte Einordnung der benannten Systeme (Ziel-, Produkt-, Handlungsträger-, Handlungssystem – Abschnitt 2.4.1) und deren Entwicklung im benannten Kontext der Optimierung der Bauleistungsfeststellung.

Für den zu untersuchenden Kontext besteht das entwickelte Modell zur Optimierung der Bauleistungsfeststellung aus einem Obersystem, welches sich in die benannten vier Subsysteme aufteilt (Abschnitt 2.4.1).

In den folgenden Abschnitten wird jeweils auf die Subsysteme zur Optimierung der Bauleistungsfeststellung eingegangen. Hierbei handelt es sich um deren abstrakte Modellbeschreibung.

Aufgrund der Komplexität und signifikanten Inhalten wird in den nachstehenden Abschnitten teilweise auf weitere Literatur eingegangen. Diese dient den speziellen weiterführenden Informationen und dem direkten Nachweis zu den angeführten Themen. Eine detaillierte Beschreibung und Aufführung dieser in der vorhergehenden Arbeit wäre für das Gesamtverständnis kontraproduktiv.

### 5.2 Zielsystem

Generell kann das *Zielsystem* als Zusammenfassung anzustrebender Zustände, oder einer Sammlung verfolgter Ziele bezeichnet werden. (Vgl. Kochendörfer et al., 2018, S. 17; Dangelmaier, 1999, S. 472). Zielsysteme treten in Form von Anforderungsbeschreibungen auf und geben das Handlungsergebnis als Endzustand in einer hierarchischen Organisation wieder. (Vgl. Patzak, 1982, S. 31)

Das Zielsystem besteht aus den Subsystemen Leistungserfassung und Leistungsmeldung, welche auf der empirischen Studie basieren (Kapitel 3). Zu beachten ist, dass die bezeichnete *Leistungserfassung* aus der empirischen Studie synonym für die *Datenerfassung* und die bezeichnete *Leistungsmeldung* synonym für die *Informationsverarbeitung der Leistungsdaten* für die fortwährende Arbeit steht. Für ein besseres Verständnis und besseren Lesefluss werden rückführend auf die Anforderungen (Kapitel 4) und deren Zielabgleich (Kapitel 7) weiterhin die Begrifflichkeiten *Leistungserfassung* und *Leistungsmeldung* verwendet. Diese beinhalten jeweils Oberziele, wie bspw. methodische und qualitätsbezogene Anforderungen, die sich in weitere drei Stufen unterteilen (Abbildung 30). Oberziele forcieren stets die Optimierung der Bauleistungsfeststellung und haben somit direkten Einfluss auf das Gesamtmodell. Die Entwicklung des Zielsystems basiert auf den in Kapitel 4 aufgestellten priorisierten Anforderungen. Aus der Grafik (Abbildung 30) geht eine horizontale Zielordnung hervor. Diese dient der Beziehungssetzung der Ziele untereinander hinsichtlich ihrer Bedeutung bezüglich des jeweiligen Oberzieles. Die horizontale Gliederung ermöglicht zugleich die Überprüfung auf Vollständigkeit und Disjunktheit. Die Ziele sind nach den Kriterien der weitestgehenden Überschneidungsfreiheit aufgegliedert. (Vgl. Patzak, 1982, S. 196 ff.)

Details zu den Zielen der einzelnen Anforderungen sind der entwickelten Anforderungsdatenbank in Anlage 6 zu entnehmen. Diese und das Zielsystem haben eine sich gegenseitig ergänzende Funktion. Die Datensätze beinhalten die Ziele und deren Erläuterungen eingestuft in Prioritäten, während das Modell das System als Struktur wiedergibt. Die Ziele sind nicht veränderbar, können jedoch auf unterschiedliche Art und Weise erreicht werden.

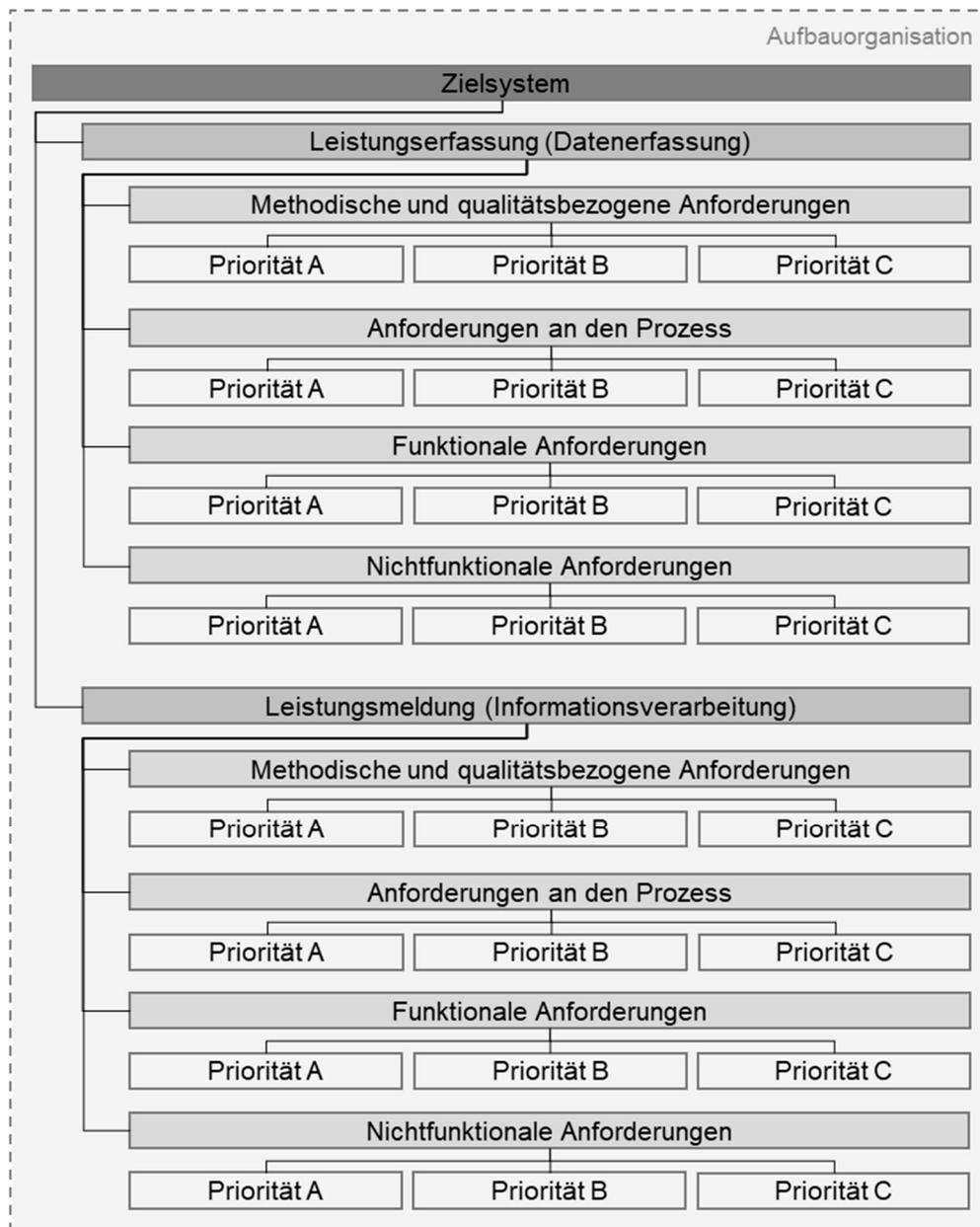


Abbildung 30: Schematischer Aufbau Zielsystem

### 5.3 Produktsystem

Im Produktsystem sind alle notwendigen Informationen zum Bauprojekt enthalten. Es besteht aus der geplanten baulichen Umsetzung und enthält somit alle erforderlichen Soll-Vorgaben. Plan-Daten bestimmen die ursprüngliche Ausgangsbasis, bspw. nach geschlossenem Vertrag mit dem AG (Abschnitt 2.1.6). Soll-Daten basieren auf jeder weiteren Fortschreibung und stellen, beliebig oft, einen neu zu erreichende Sachstand dar. In der Praxis empfiehlt sich die Fortschreibung der Soll-Daten mit Soll<sup>1</sup> usw.

Reschke stellt den Aufbau des Produktsystems als Gliederung für die Phasen des Handlungssystems (Abschnitt 5.5) dar, woraus sich der Aufbau sowie der Ablauf eines Projektes ergibt. (Vgl. Reschke, 1989, S. 41) Das Produktsystem wird synonym als bauliche Anlage in Form eines Arbeitsgegenstandes verstanden. (Vgl. Kochendörfer et al., 2018, S. 17)

Die notwendigen Informationen zu einem Bauprojekt können in herkömmlicher Weise (2D-Pläne, diverse informationsenthaltende Dokumente etc.) oder wie im Abschnitt 2.2

beschrieben per modellbasierter Projektabwicklung vorliegen. Im Kontext des vorliegenden Themas besteht das Produktsystem aus den Subsystemen Bauprojekt, Bauprojektcontrolling, Baustellencontrolling sowie Leistungsmeldung, welche durch die Informationen von Plan- und Soll-Daten ergänzt werden (Abbildung 31). Die Basis des entwickelten Produktsystems ist Abschnitt 2.1 zu entnehmen. Die inhaltliche Einordnung zu den Subsystemen kann hierbei Abschnitt 2.1.3 entnommen werden.

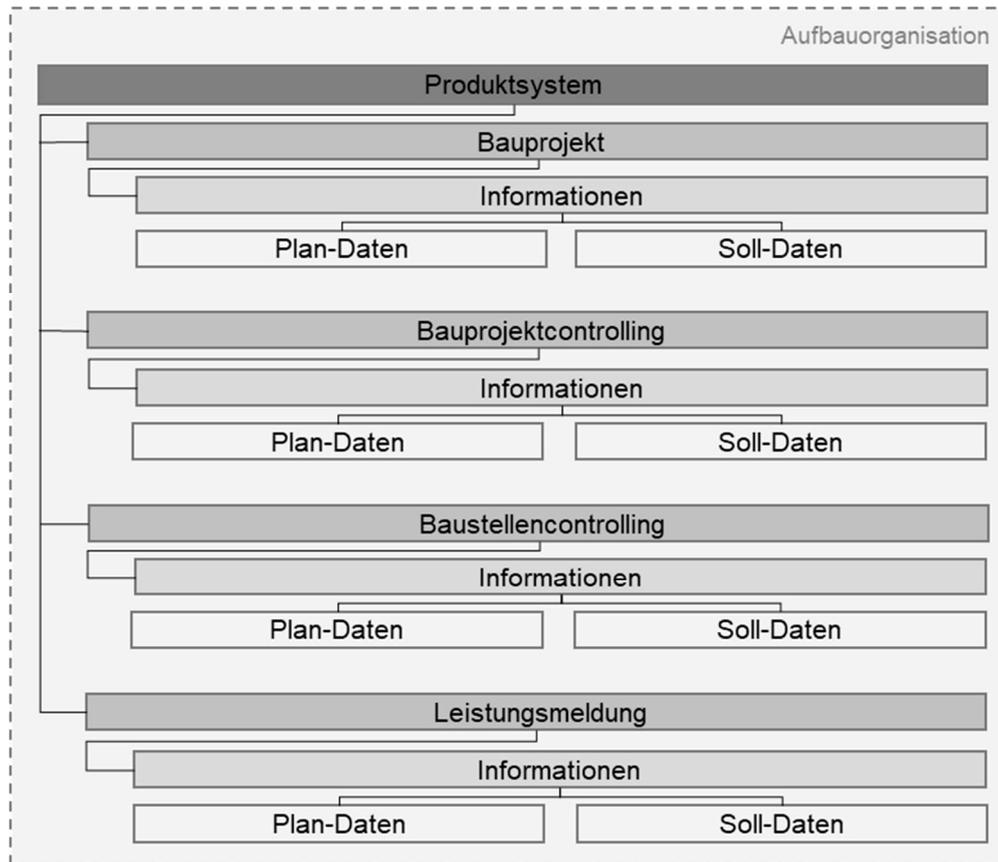


Abbildung 31: Schematischer Aufbau Produktsystem

In der vorliegenden Arbeit werden Plan- bzw. Soll-Daten als gegebene Grundlage angenommen, gegenüber der das Ist referenziert wird.

#### 5.4 Handlungsträgersystem

Das Handlungsträgersystem tritt generell in Form von Organisationen, Unternehmungen bzw. als Sachmittelsysteme und einzusetzende Instrumente auf. Handlungsträgersysteme stellen den Träger der Aktivitäten dar und entsprechen der ausführenden Einheit des Handlungssystems zum Erreichen der Ziele. (Vgl. Kochendörfer et al., 2018, S. 17; Patzak, 1982, S. 31) Der schematische Aufbau des vorliegenden Handlungsträgersystems ist der folgenden Abbildung 32 zu entnehmen.

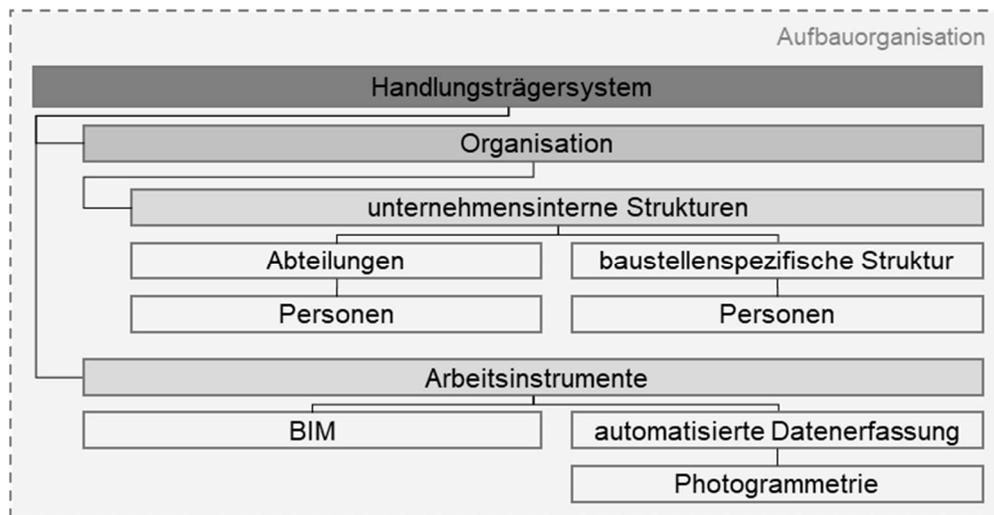


Abbildung 32: Schematischer Aufbau Handlungsträgersystem

Die Komponenten des Handlungsträgersystems stellen zum einen die Organisation in Form von unternehmensinternen Strukturen und zum anderen die Arbeitsinstrumente dar. Die organisatorischen Strukturen können in einer Vielzahl vorliegen und sind letztlich für den Einsatz des Modells den Unternehmen anzupassen. Schwerpunkt des Handlungsträgersystems sind die Arbeitsinstrumente. Auch diese liegen in einer Vielzahl vor und können nicht in der Grundgesamtheit abgebildet werden. Eine entsprechende Auswahl kann den vorangegangenen Studien in den Abschnitten 2.1.7, 2.2 sowie 2.3 entnommen werden. Die für das vorliegende Modell relevanten Arbeitsinstrumente können in der Abbildung 32 nachvollzogen werden.

Der grundlegende Prozess, welcher im nachfolgenden Abschnitt und Handlungssystem umfassend dargestellt wird, greift auf das Arbeitsinstrument BIM (Abschnitt 2.2.7) und auf die automatisierte Erfassung, die Photogrammetrie (Abschnitt 2.3.2), zu. Die Anwendung der BIM-Methodik impliziert die Wiedergabe der Plan- und Soll-Daten aus dem Produktsystem (Abbildung 31) im Vergleich und als Auswertungsanalyse aus den erhobenen Daten mittels Photogrammetrie im Sinne des entwickelten Zielsystems.

## 5.5 Handlungssystem

Das Handlungssystem dient der Überführung des Anfangszustandes (Problem) in den angestrebten Endzustand (Problemlösung) durch erforderliche Aktivitäten. Diese treten in Form von Prozessen und Vorhabenplänen auf. Die zur Zielerreichung erforderliche Handlung bildet das Handlungssystem. (Vgl. Kochendörfer et al., 2018, S. 17; Reschke, 1989, S. 48)

Das Handlungssystem beinhaltet hinsichtlich des vorliegenden Untersuchungsgegenstandes die Prozesse der Bauleistungsfeststellung innerhalb bauausführender Unternehmen. Es sind zum einen die Prozesse, die gegenwärtig innerhalb der Bauleistungsfeststellung etabliert sind und wo deshalb eine Veränderung für die Akzeptanz kontraproduktiv ist. Des Weiteren beinhaltet es neu entwickelte und neu zu integrierende Prozessstrukturen in die bisherige Vorgehensweise. Die Prozesse sind in Subprozesse unterteilt, um die vorhandene Komplexität abbilden zu können. Zur Wahrung der Übersichtlichkeit erfolgt eine weitere Untergliederung in Ebenen. (Abbildung 33) Die Ebenen sind wie folgt charakterisiert: Ebene 0 ( $E_0$ ) bildet das Verfahren der Bauleistungsfeststellung ab. Ebene 1 ( $E_1$ ) beinhaltet die erforderlichen

Hauptprozesse zur Ermittlung der Bauleistung. So stellt die Leistungserfassung die Datenerhebung dar - es wird Input generiert, welcher in der Leistungsermittlung verarbeitet und das Ergebnis mit der Leistungsmeldung ausgegeben wird. Ebene 2 (E<sub>2</sub>) vereint die notwendigen zu erfüllenden inhaltlichen Aspekte und kann weitere Subprozesse enthalten, die dann die Ebene 3 (E<sub>3</sub>) darstellen. Diese sind nach Gliederungstiefe der Nummerierung in die jeweilige Ebene einzuordnen. Bspw. entspricht der Prozess 2.1.2 *Vergleich Soll- zu Ist-Daten (Punktwolke zu Punktwolke)* der Ebene 3.

Die *Leistungsermittlung* stellt in der E<sub>1</sub> einen der drei zu erfüllenden Hauptprozesse für die Bauleistungsfeststellung dar. Diese wiederum besteht aus den beiden Subprozessen 2.1 *Bewertung Fertigstellungsgrad* und 2.2 *Modifizierte Leistungsbewertung*, welche ebenfalls aus diversen nachfolgenden Subprozessen bestehen und erforderlich sind, um den Hauptprozess 2 *Leistungsermittlung* zu erfüllen. Erst wenn die Hauptprozesse 1 *Leistungserfassung* und 2 *Leistungsermittlung* erfüllt sind, kann die *Leistungsmeldung* erfolgen.

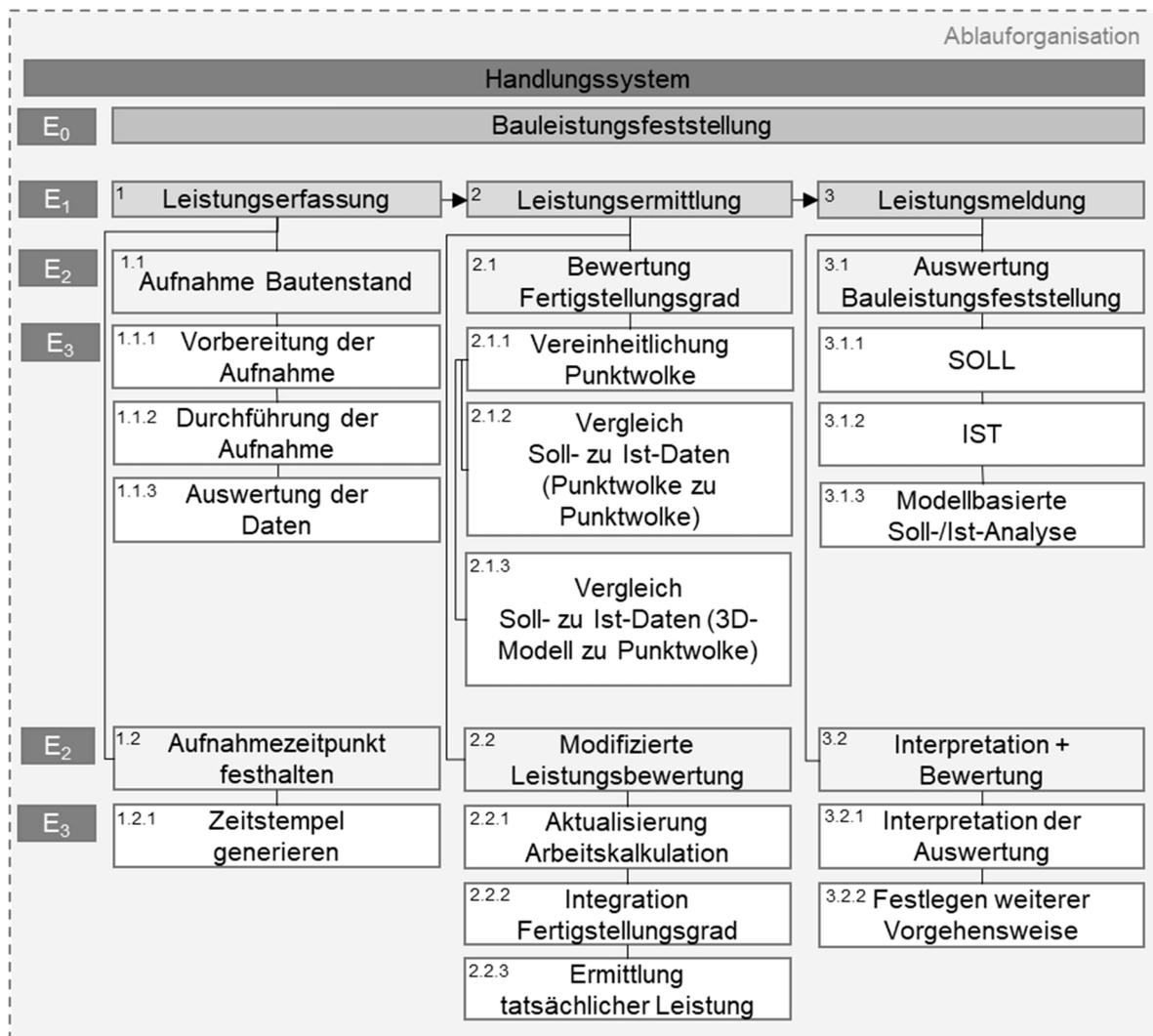


Abbildung 33: Überblick zu den Bestandteilen des Handlungssystems

Ausgangspunkt ist die Veranlassung der Bauleistungsfeststellung, welche zu jedem beliebigen Zeitpunkt durchführbar sein sollte, um die Gegebenheiten und Anforderungen der unternehmensinternen Prozesse zu erfüllen. Dies wird anhand der nachfolgenden Abbildung 34 aufgegriffen. Die Darstellung der Prozessmodellierung erfolgt auf Basis des Abschnitts

2.4.2. Zur besseren Veranschaulichung werden die Prozessketten in der vorliegenden Arbeit teilweise vertikal dargestellt.

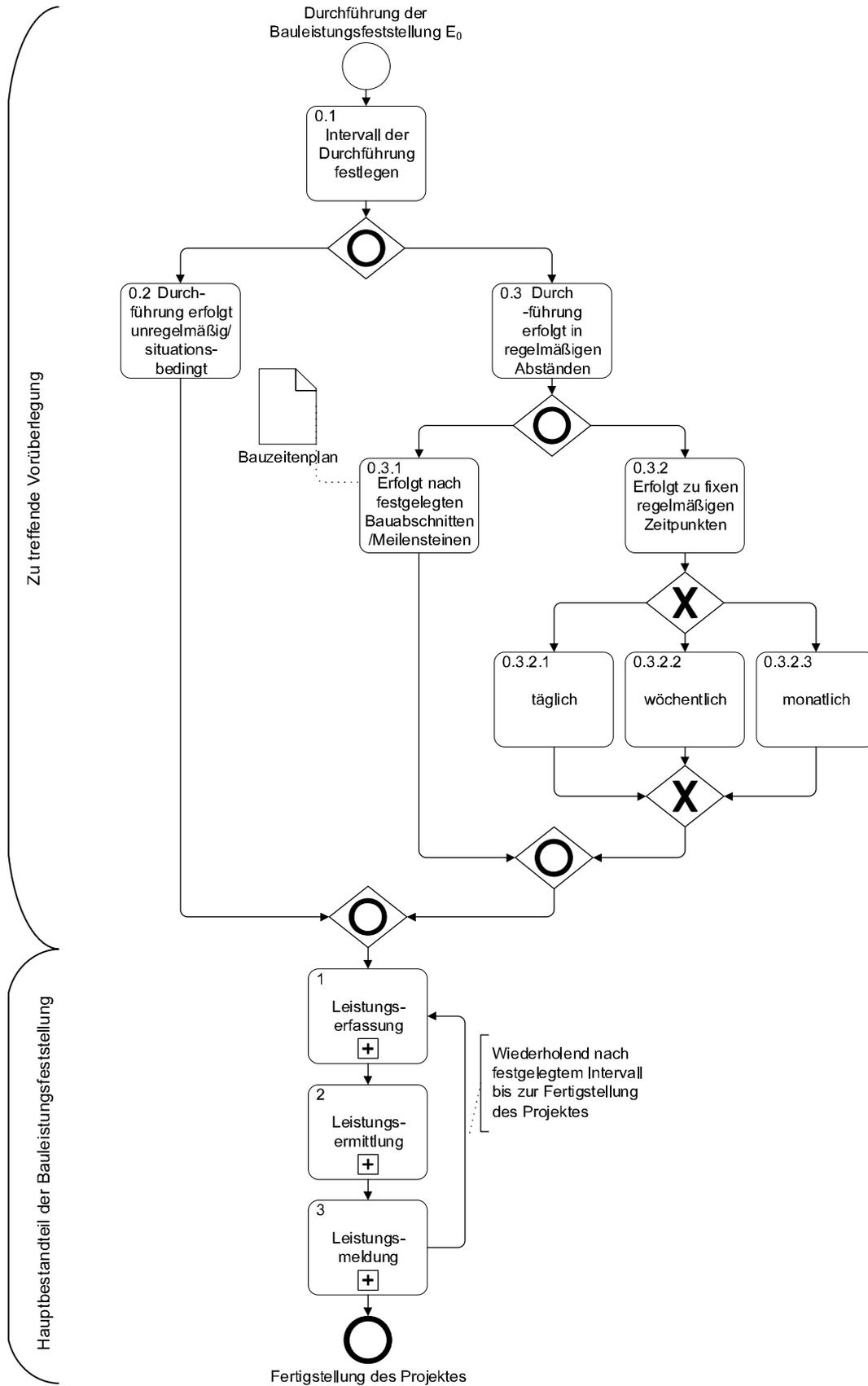


Abbildung 34: Zeitliche Einordnung und Prozess der Bauleistungsfeststellung sowie von deren Hauptprozessen – Ebene 1

### 5.5.1 Prozess der Leistungserfassung im Handlungssystem

Bezug nehmend auf den Stand der Wissenschaft Abschnitt 2.3 sowie 2.3.2 und die empirische Analyse sowie deren priorisierte Anforderungen (Kapitel 4) erfordert das Vorgehen, der Erfassung des Ist-Zustandes einer Baustelle per photogrammetrischer Methode. Auf Basis des Abschnitts 2.2.7 zu den wesentlichen Unterschieden des Hochbaus im Vergleich zum Straßen- und Tiefbau sowie den in Abschnitt 2.3.2 untersuchten Aufnahmestrategien ist die Erfassung mittels UAV (*Unmanned Aerial Vehicle-System*) vorzusehen. Der Untersuchungsgegenstand beschränkt sich auf das Schichtenmodell, welches die primären Bauprozesse des Straßen- und Tiefbaus abbildet. Grundsätzlich wird eine Automatisierung für die Erfassung notwendiger Daten angestrebt. Aus diesen können Folgeaktivitäten durch automatische Adaption erwachsen. Aus der Abbildung 35 geht der Prozess zur *1.1 Aufnahme des Bautenstandes* hervor, welcher sich auf  $E_3$  in die reduzierten Teilprozesse *Vorbereitung der Aufnahme*, *Durchführung der Aufnahme* und *Auswertung der Daten* gliedert.

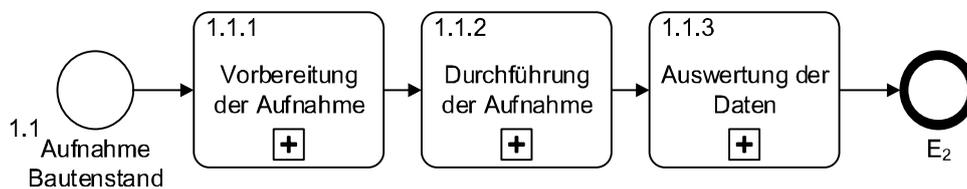


Abbildung 35: Aufnahme Bautenstand – Ebene 2

#### 1.1.1 Vorbereitung der Aufnahme

Dem reduzierten Teilprozess *Vorbereitung der Aufnahme* können alle im Vorfeld zu klärenden Aspekte zum Flug eines UAV-Systems entnommen werden. Ausführlich ist der Prozess mit all seinen Elementen Anlage 7 zu entnehmen. Hervorgehoben sei die *Festlegung der erforderlichen Ergebnisse*, in der bspw. Genauigkeit und Verortung des Koordinatensystems enthalten sind. Die *Einhaltung und Genehmigung rechtlicher Voraussetzungen* des Luftfahrtbundesamtes sowie der Durchführungsverordnung (EU) 2019/947 der Kommission über die Vorschriften und Verfahren für den Betrieb unbemannter Luftfahrzeuge (Vgl. Debus und Mellenthin Filardo, 2021, S. 25 ff.; Durchführungsverordnung (EU) 2019/947, 2019, L152/45 ff.) ist zu beachten. Das betrifft auch die Notwendigkeit erforderlicher Passpunkte oder die Durchführung eines *automatisierten Fluges* für die Erhöhung des Automatisierungsgrades.

#### 1.1.2 Durchführung der Aufnahme

Der Anlage 8 ist der detaillierte Verlauf zu *1.1.2 Durchführung der Aufnahme* zu entnehmen. Ebenso sollte eine Erhöhung des Automatisierungsgrades angestrebt werden und der Prozess mit einer *automatischen Aufnahme des Projektes anhand des Flugplanes* erfolgen. Dies mindert redundante Arbeiten und Fehler bei der manuellen Steuerung. Ein im Vorfeld programmierter Flugplan kann beliebig oft und wiederholend angewandt werden – das Ergebnis der Daten bleibt gleich. Eine Längsüberdeckung der aufgenommenen Bilder von  $p = 80\%$  bzw. Querüberdeckung von  $q = 60\%$  sind üblich. (Vgl. Luhmann, 2018b, S. 610) Der Bildmaßstab ist ein resultierender Parameter von Flughöhe, Brennweite bzw. GSD (Ground Sampling Distance) und Pixelgröße des Bildsensors. GSD gibt die Beziehung zwischen Kamerawinkel und Distanz wieder und hat direkten Einfluss auf die Überlappungsrate. Es beschreibt die räumliche Auflösung der Bildqualität. (Vgl. Chen et al., 2019, S. 8 f.) Mit den heute eingesetzten Systemen liegen typische GSD-Werte im Bereich von 5–20 mm.

Erreichbare Messgenauigkeiten in der Praxis liegen bei 1 Pixel in der Lage und 2–3 Pixel in der Höhe. (Vgl. Luhmann, 2018b, S. 610). Die Flugplanung wird dementsprechend durch diverse Parameter bestimmt. Detaillierte diesbezügliche Ausführungen und deren weitere Berechnungsgrundlagen sind Chen et al. und Luhmann zu entnehmen. (Vgl. Chen et al., 2019, S. 4 ff.; Luhmann, 2018a, S. 36; Luhmann, 2018b, S. 606 ff.)

Die nachfolgende Auswertung und Weiterverarbeitung der Daten wird entsprechend einem wiederholenden Flugplan erleichtert, da die Aufnahmen auf gleicher Basis beruhen. Nichtsdestotrotz besteht die Möglichkeit einer *manuell gesteuerten Aufnahme des Projektes*.

### 1.1.3 Auswertung der Daten

Der Prozess der 1.1.3 Auswertung der Daten erfolgt nach dem dreidimensionalen Messverfahren der Photogrammetrie (Abschnitt 2.3.2). Der Photogrammetrie liegt als ein mathematisches Modell die zentralprojektive Abbildung zugrunde. Es werden Form und Lage des Objektes über die Rekonstruktion von Strahlenbündeln ermittelt, wobei jeder Bildpunkt zusammen mit dem Projektionszentrum eine Richtung des entsprechenden Strahls zum Objekt festlegt. Durch die bekannte Lage des Aufnahmesystems kann jeder Bildstrahl absolut in 3D beschrieben werden – und im Schnitt von mindestens zwei korrespondierenden, räumlich verschiedenen Bildstrahlen lässt sich ein Objektpunkt bestimmen. (Vgl. Luhmann, 2018b, S. 29) Der Arbeitsablauf (Abbildung 36) erfolgt weitestgehend automatisiert.

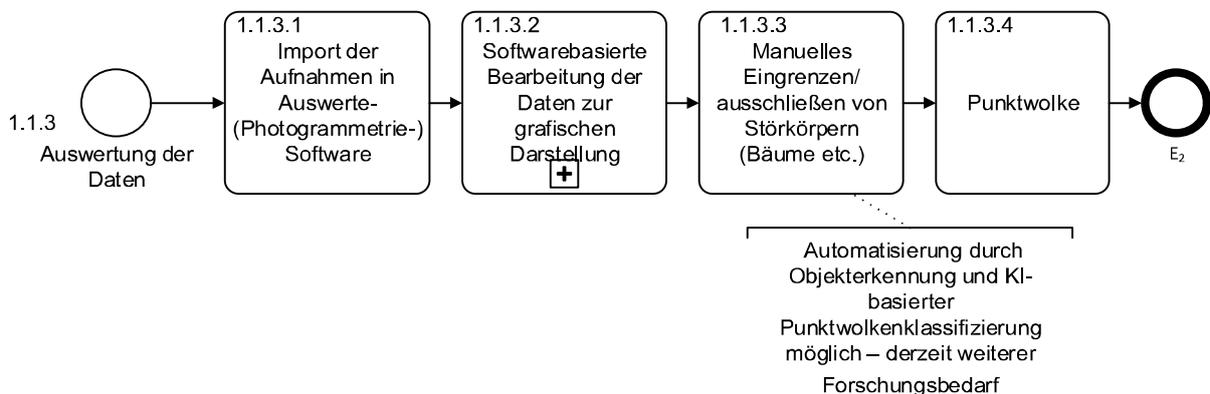


Abbildung 36: Auswertung der Daten – Ebene 3

Nach Import der aufgenommenen Daten liefern i. d. R. photogrammetrische Systeme dreidimensionale Objektkoordinaten, die auf Bildmessung basieren. (Vgl. Luhmann, 2018b, S. 34 f.) Heute existiert eine Vielzahl an Softwareanwendungen, die diesen Prozess automatisiert durchführen. Detailliert kann die Bearbeitung der Daten Abschnitt 2.3.2 nachvollzogen werden. Der Anlage 9, 1.1.3.2 *Softwarebasierte Bearbeitung der Daten zur grafischen Darstellung* ist der grundlegende automatisierte Prozess zur Darstellung einer räumlichen Auswertung zu entnehmen.

Das Entfernen von Verdeckungen (wie Fahrzeuge, Schutzplanken, Maschinen oder andere Störkörper) aus der aufgenommenen Punktwolke ist ein notwendiger Bearbeitungsschritt, um die Ergebnisse des nachfolgenden geometrischen Vergleichs nicht zu verfälschen. Eine Möglichkeit, diesen Prozess zu automatisieren, ist das Entfernen von Punkten basierend auf den geometrischen Merkmalen ihrer lokalen Nachbarschaft. Die Hauptkomponentenanalyse

(PCA) ist eine Methode zur Extraktion geometrischer Merkmale, insbesondere zur Schätzung der Normalvektoren von Oberflächen. (Vgl. Hu et al., 2019, S. 8 ff.) Unter der Annahme, dass jeder kleine Bereich einer Straßenoberfläche durch eine Ebene mit einem relativ kleinen Winkel zur globalen xy-Ebene approximiert werden kann, können Oberflächennormalen als Merkmal verwendet werden, um Punkte zu entfernen, die zu den nicht-horizontalen Teilen der Verdeckungen gehören (bspw. die Seitenflächen eines Autos). Andere Methoden, wie z. B. die Identifizierung ganzer Punktcluster anhand ihrer geometrischen Merkmale, sind in der Lage, auch die nicht-horizontalen Bereiche der Okklusion zu entfernen. Solche Methoden sind im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht implementiert und Gegenstand weiterer Forschung.

Das gewählte Vorgehen zur Leistungserfassung ist der Offline-Photogrammetrie zuzuordnen. Es wird eine unbestimmte Anzahl von Messbildern erfasst, welche zu einem späteren Zeitpunkt, an einem anderen Ort und/oder von einem anderen Bediener ausgewertet werden. (Vgl. Luhmann, 2018b, S. 163 ff.) Die Aufnahme der Online-Photogrammetrie ist für den vorliegenden Ansatz ungeeignet. Aufgrund der gleichbleibenden Dynamik der Baustelle sowie des fortwährenden horizontalen Baufortschrittes sind feste Kameraanordnungen zur Aufnahme horizontaler dynamischer Ausdehnungen mit hohem Aufwand verbunden. Aufwand und Nutzen stehen in keinem gesunden Verhältnis.

#### *1.2.1 Zeitstempel generieren*

Für die weitere Auswertung der aufgenommenen und bewerteten Daten ist das Festhalten des Aufnahmezeitpunkts ein unerlässliches Kriterium. Es dient der Leistungsmeldung zum Vergleich des Soll- zum Ist-Stand. Für die detaillierte Abbildung des Ists (Prozess 3.1.2) ist der Aufnahmezeitpunkt des Bautenstands von hoher Bedeutung, denn nur so können Abweichungen zu dem vorgegebenen Soll tatsächlich ermittelt werden.

Nach Auswertung der Daten und dem Erstellen der Punktwolke wird diese im Zuge der *Leistungsermittlung* zur Bestimmung des Fertigstellungsgrades weiterverarbeitet und ist dem nachfolgenden Abschnitt zu entnehmen.

### **5.5.2 Prozess Leistungsermittlung des Handlungssystems**

Bezug nehmend auf den Stand der Wissenschaft (Abschnitt 2.1.5) erfordert die Leistungsermittlung das Erfassen der geleisteten Menge. Dies kann durch Erstellung eines rechnerischen Aufmaßes oder durch die Festlegung des Fertigstellungsgrades erfolgen. Auf Basis der empirischen Analyse sowie der daraus abgeleiteten priorisierten Anforderungen (Kapitel 4) soll die Leistungsermittlung bspw. in kürzeren Perioden als den Abrechnungszeiträumen möglich sein. Hervorzuheben ist, dass die Festlegung des Fertigstellungsgrades nicht auf Schätzungen beruhen soll, sondern auf nachvollziehbaren detailliert erfassten Werten, die nicht auf händischen und redundanten Eingaben beruhen. Ausgehend von dieser Forderung wird die erzeugte Punktwolke aus dem Prozess 1.1.3 *Auswertung der Daten* und 1.1 *Aufnahme des Bautenstandes* herangezogen und für 2.1 *Bewertung des Fertigstellungsgrades* automatisch analysiert und berechnet.

Zu der Auswertung von Punktwolken und einem Vergleich in einer 3D-Geometrie existiert eine Vielzahl an Methoden (Abschnitt 2.3.2). Von Ellinger und Walther wird ein umfassender Überblick dieser Methoden gegeben. (Vgl. Ellinger und Walther, 2021, S. 342 ff.) Obwohl es viele Gemeinsamkeiten in den Methoden und Technologien gibt, die zur Automatisierung der

Fortschrittüberwachung von Hochbau- und Infrastrukturbaustellen eingesetzt werden, gibt es auch signifikante Unterschiede. Während Gebäude größtenteils aus eindeutigen Objekten bestehen, die auf diverse Arten im Raum ausgerichtet sein können, sind Straßen i. d. R. aus mehreren Schichten gebaut, die relativ nah und parallel zur xy-Ebene liegen. Die Abmessungen von Straßenschichten folgen dem Muster  $d_h \ll d_b \ll d_l$ , was bedeutet, dass diese extrem dünn im Vergleich zu ihrer Breite und Länge sind. Im Straßenbau ist daher eine andere Art der Raumaufteilung von Vorteil, um Punktwolken in 3D-Modellen zu registrieren. Vick und Brilakis sind die Ersten, die eine Methode zur Partitionierung des euklidischen Raumes beschreiben, welche speziell für die Erkennung von Straßenschichten in Punktwolken optimiert ist. (Vgl. Vick und Brilakis, 2018, S. 4 ff.)

Als erster Prozessschritt folgt die *Vereinheitlichung der Punktwolke für den Straßenbau*, was notwendig ist, um eine regelmäßige bewertbare Struktur zu erhalten. Der gesamte Prozess 2.1 der *Bewertung des Fertigstellungsgrades* kann der nachstehenden Bewertung in Abbildung 37 entnommen werden. Der Vergleich der Soll- zu Ist-Daten kann mittels eines reinen Punktwolkenvergleichs abgebildet werden oder indem die Punktwolke gegenüber dem 3D-Modell referenziert wird.

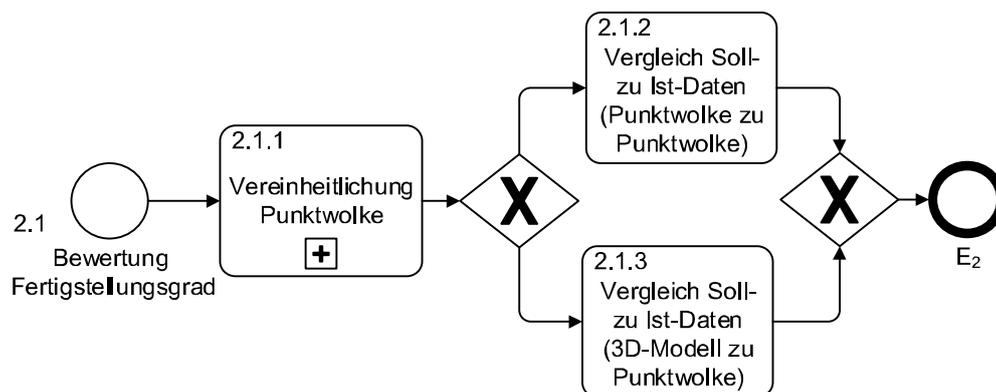


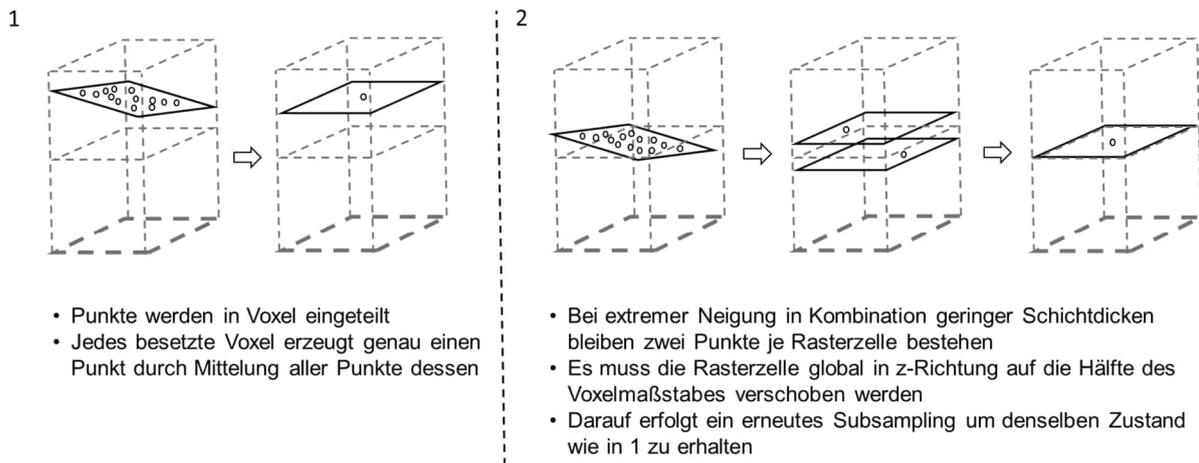
Abbildung 37: Bewertung Fertigstellungsgrad – Ebene 2

### 2.1.1 Vereinheitlichung der Punktwolke für den Straßenbau

Mit der Vereinheitlichung der Punktwolke wird eine maximal einheitliche Punktdichte erzeugt, welche für die effiziente Nutzung einer Punktwolke für die Bewertung des Fertigstellungsgrades erforderlich ist. Während dieses Vorgehens wird das Datenvolumen der ursprünglich aufgenommenen Punkte deutlich reduziert, indem die Punktdichte innerhalb der dichten und spärlichen Bereiche ausgeglichen wird. Des Weiteren wird die Zahl an Ausreißern und die Häufigkeit des Rauschens nochmals verringert. Dies dient nicht nur einer besseren Aussage über den tatsächlichen Fertigstellungsgrad – sondern ebenso der computergestützten Verarbeitung, bei der weniger Leistung benötigt wird und der Prozess performant ist. Das vorliegende Konzept basiert weitestgehend auf der Arbeit von Vick und Brilakis, in der eine hierarchische Raumpartitionierungsdatenstruktur namens *BrickTree* angewandt wird. Die Methode partitioniert den Raum in der xy-Ebene in ein gleichmäßig verteiltes Gitter. In der z-Dimension ist der Raum nicht gleichmäßig partitioniert. Die Äste des *voxelTree* bestehen aus rechteckigen Boxen, deren Höhe unabhängig von ihrer Länge und Breite ist. (Vgl. Vick und Brilakis, 2018, S. 5 f.) Der Unterschied des vorliegenden Vorgehens im Vergleich mit dem von Vick und Brilakis besteht darin, dass die Autoren Gleichungen

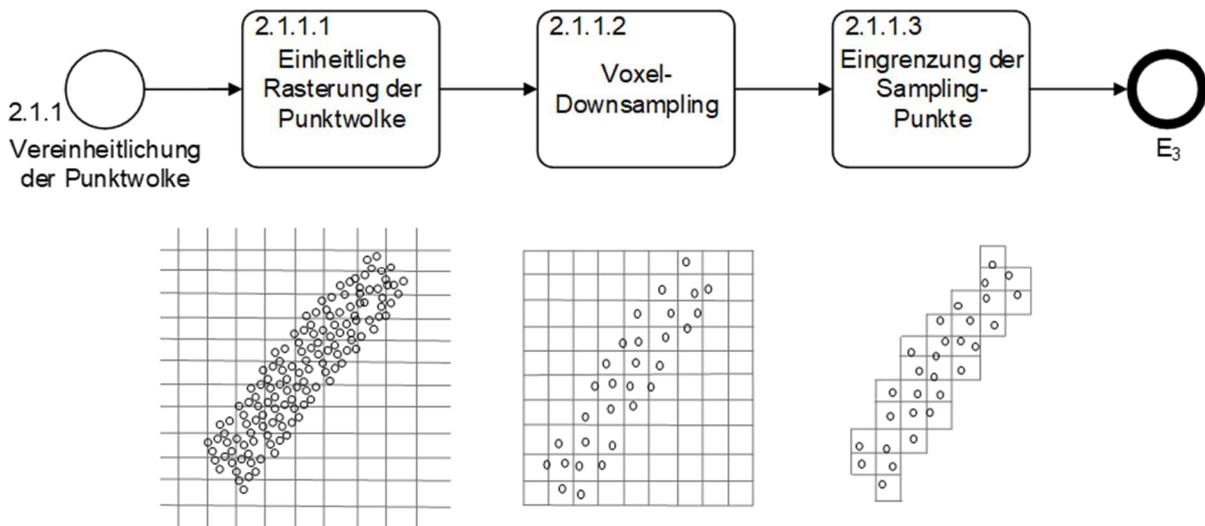
entwickeln, die einzelne Punkte in einem definierten Maß unterhalb und oberhalb der Schicht erfassen. Das vorliegende Konzept baut mit einem Voxel-Gitter-Filterungsprozess darauf auf.

In der gemeinsamen Entwicklung mit Vala wurde der Filterungsprozess per Voxel-Downsampling für den Straßenbau umgesetzt. (Vgl. Ellinger und Walther, 2021, S. 346 ff.; Vala, 2020, S. 22 ff.) Dieser wird anschließend im Prozess des Gesamtsystems der Bauleistungsfeststellung implementiert. Per Voxel-Downsampling wird eine gleichmäßige und einheitliche Punktwolke erzeugt. Es wird ein einheitliches, regelmäßiges Raster mit einem definierten mittleren Abstand der Punkte in der xy-Ebene erzeugt (Abbildung 38). Der Algorithmus interpoliert automatisch den Mittelwert und erstellt einen Punkt pro Voxel.



**Abbildung 38: Schematische Darstellung des Voxel-Downsamplings für den Straßenbau**  
 Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Ellinger und Walther, 2021, S. 345; Vala, 2020, S. 24

Der Prozess 2.1.1 der *Vereinheitlichung der Punktwolke für den Straßenbau* ist wie folgt zu verstehen (Abbildung 39):



**Abbildung 39: Vereinheitlichung der Punktwolke für den Straßen- und Tiefbau – Ebene 3**

Der Parameter *gridCellSize* beschreibt die Vornahme eines einheitlichen Rasters und basiert auf der Idee von Vick und Brilakis. Er bestimmt die Granularität der inkrementellen Oberflächenerkennung für den gegebenen Datensatz. Eine Festlegung dieser Größe hat je nach geforderter Granularität zu erfolgen. Die Arbeit konstruiert achsenausgerichtete Voxel

unter der Annahme, dass Straßenoberflächen im definierten Bereich innerhalb des durch *gridCellSize* definierten Raumes als flach approximiert werden. Diese vereinfachende Annahme reduziert die Komplexität der Punkt-zu-Voxel-Zuordnung, indem sie sich auf eine Reihe von einfachen Indexierungsberechnungen in x-, y- und z-Richtung beschränkt. (Vgl. Vick und Brilakis, 2018, S. 5 f.)

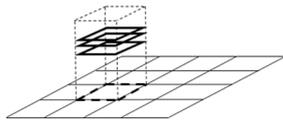
Eine weitere Untersuchung und Entwicklung zeigt die Detektion der Punkte mit einem Cluster Algorithmus, um den Fertigstellungsgrad zu identifizieren. Dieses Vorgehen erwies sich in der weiteren Verarbeitung jedoch als nicht praktikabel, da einzelne Bereiche der jeweiligen Schicht nicht detailliert wiederzugeben sind. (Vgl. Walther et al., 2021, S. 4 ff.)

Der Prozess *2.1.1 Vereinheitlichung der Punktwolke* stellt die Basis für den darauffolgenden Prozess *2.1.2 Vergleich Soll- zu Ist-Daten (Punktwolke zu Punktwolke)*, oder *2.1.3 Vergleich Soll- zu Ist-Daten (3D-Modell zu Punktwolke)* dar.

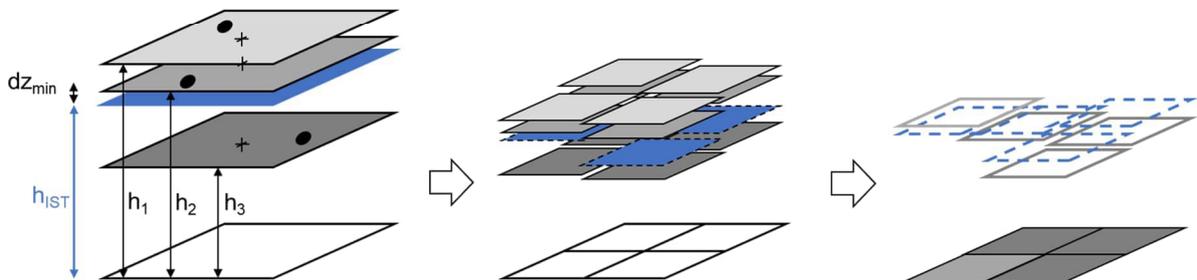
#### *2.1.2 Vergleich Soll- zu Ist-Daten (Punktwolke zu Punktwolke)*

Zunächst erfolgt die Ableitung synthetischer Punktwolken (Anlage 10). Diese dienen als Soll-Basis für den späteren Vergleich zur aufgenommenen Punktwolke. Die Erstellung und Ableitung einer synthetischen Punktwolke unterliegt einem ähnlichen Prozess wie *1.1.3.2 Softwarebasierte Bearbeitung der Daten zur grafischen Darstellung* aus *1.1 Aufnahme Bautenstand* (S. 109 ff.). Der Unterschied besteht darin, dass auf der Baustelle keine Aufnahme vor Ort erforderlich ist und die zu importierenden 3D-Daten geodätisch im Koordinatensystem eingeordnet werden müssen. Die Punktwolken werden für jede einzelne Schicht bzw. jedes Bauteil erzeugt. Bei der Auswertung ist darauf zu achten, dass nicht die ganze Soll-Schicht als Gegenwert herangezogen wird, sondern nur die Oberfläche der jeweiligen Schicht. Der Folgeprozess *1.1.3.3 Manuelles Eingrenzen/Ausschließen von Störkörpern (Bäume etc.)* entfällt, da nur wesentlich erforderliche Elemente exportiert werden. Hierfür ist es notwendig auf Daten des Produktsystems (Abbildung 31, S. 105) zurückzugreifen. Die erforderlichen geometrischen Daten stammen aus dem 3D-Modell (Soll-Daten), welche bereits vor der Bauausführung bereitgestellt werden.

Sind die Soll- und Ist-Daten im selben Koordinatenrahmen datiert und unterliegen einem einheitlichen Raster, kann der Vergleich der Daten erfolgen. Ausschlaggebend für den automatischen Algorithmus ist die z-Koordinate. Zur Vermeidung der Überlappung oder Verschmelzung von Voxeln ist es unabdingbar, die Voxel um die Hälfte der Dicke der dünnsten geplanten Straßenschicht zu verschieben. Ist das Voxel-Quadratgitter allen Oberflächen zugeordnet, berechnet der Algorithmus den minimalen Abstand zwischen den Ist-Daten und den Soll-Daten. Im letzten Schritt werden die Ist-Daten (Ist-Punkte) den nächstgelegenen Soll-Daten (Soll-Punkte) zugewiesen (Abbildung 40).



$h_1, h_2, \dots, h_n$  = Sollhöhen einer Rasterzelle  
 $h_{IST}$  = aktuelle Höhe abgeleitet aus den Ist-Daten (Punktwolke)  
 $dz_{min}$  =  $\min(|h_{IST} - h_1|, |h_{IST} - h_2|, \dots, |h_{IST} - h_n|)$

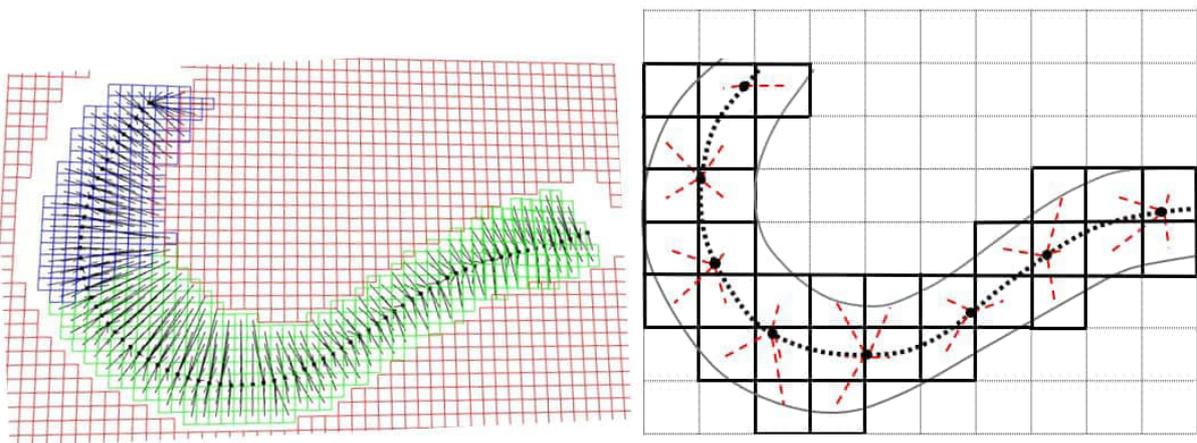


**Abbildung 40: Schematische Darstellung Punktwolkenvergleich**

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Vala, 2020, S. 26

Ausgehend von diesem Prozess kann nachfolgend der Fertigstellungsgrad der einzelnen Schichten einer Straßenbaumaßnahme abgeleitet werden.

Folglich werden alle Ergebnisse zunächst für jene Regionen berechnet, die durch ein regelmäßiges Gitter aus Quadraten in der xy-Ebene definiert sind. Diese Ergebnisse werden auf diskrete Abschnitte der Trasse projiziert, die durch Punkte repräsentiert werden, welche in regelmäßigen Abständen (gemessen anhand der Trassierung) von dieser Trasse abgetastet werden. Hierbei werden nur Gitterzellen berücksichtigt, deren Mittelpunkte innerhalb der xy-Grenzen der geplanten Geometrie des 3D-Modells (Soll-Daten) liegen (Abbildung 41).



**Abbildung 41: Exemplarische Projektion der rasterbasierten Ergebnisse auf die Trasse**

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Ellinger und Walther, 2021, S. 346

Im beschriebenen Prozess der geometrischen Projektion der realen Welt in xyz-Koordinaten sind Fehlerquellen zu berücksichtigen. Zum einen kann nicht garantiert werden, dass die konstruierten Straßenschichten exakt der Entwurfsgeometrie entsprechen und zum anderen ist bei Punktwolken aus UAVs und Photogrammetrie nicht garantiert, dass diese mit der wahren Oberfläche genau übereinstimmen. Da eine absolute Sicherheit nie gegeben ist, sollte, wie in Ellinger und Walther (2021) beschrieben, die Zuweisung des z-Wertes nur unter der Angabe einer gewissen Wahrscheinlichkeit erfolgen. Unter der Annahme, dass die Abweichung der z-Komponente normalverteilt ist, kann diese nach dem Gauß'schen Fehlerintegral ( $\Phi$ ) der Standardnormalverteilung berechnet werden.





Abbildung 43: Exemplarische Abbildung einer ausgewerteten Punktwolke

### 2.1.3 Vergleich Soll- zu Ist-Daten (3D-Modell zu Punktwolke)

Wie bei dem zuvor beschriebenen Prozess 2.1.2 Vergleich Soll- zu Ist-Daten (Punktwolke zu Punktwolke) müssen Punktwolke sowie 3D-Modell im gleichen Koordinatenrahmen registriert werden, um eine gegenseitige Überlappung zu erzeugen. Der georeferenzierte Schichtenaufbau des 3D-Modells muss für weitere Analysen in mehrere Bereiche unterteilt werden können. Diese Unterteilung sollte parametrisch variabel integriert werden, damit beliebig viele Unterteilungen möglich sind (Abbildung 44). Je mehr Unterteilungen vorgenommen werden, desto genauer kann die Auswertung erfolgen, desto größer wird jedoch auch die Datenmenge. Die Unterteilung in diverse Bereiche sollte aber über alle Schichtebenen gleich sein, um eine Auswertung auf vergleichbarer Grundlage zu erhalten.

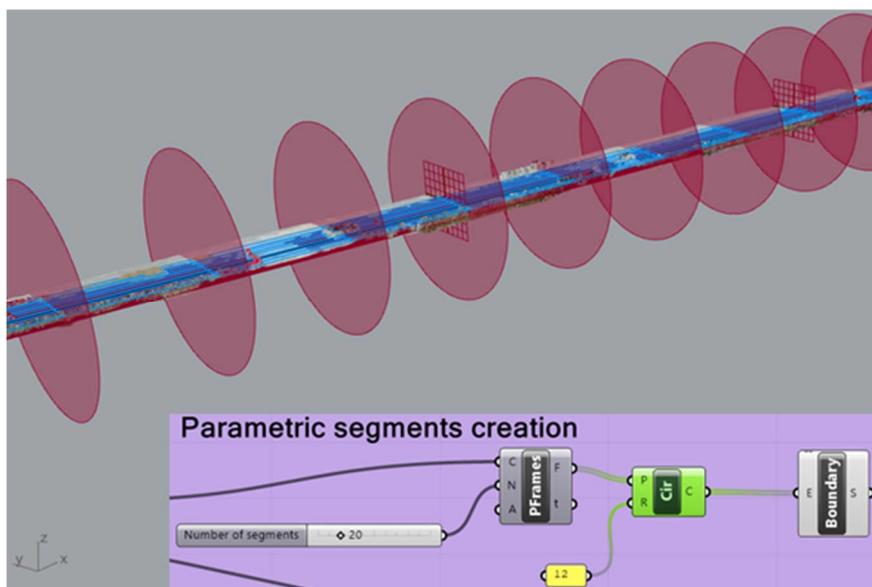
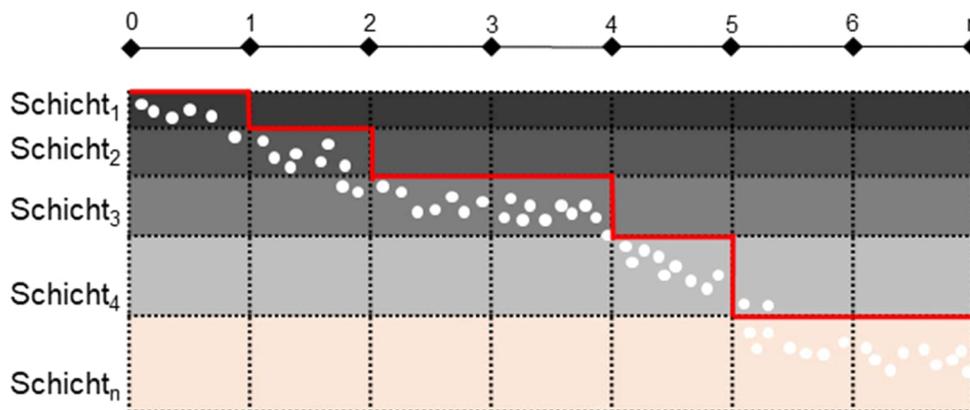


Abbildung 44: Exemplarische Abbildung der variablen Unterteilung des Schichtenaufbaus mit überlappender Punktwolke

Auf Basis der Überlappung des georeferenzierten 3D-Modells mit der aufgenommenen Punktwolke und dessen Unterteilung kann für jeden Teilbereich, jede Schicht und jedes Bauteil die Auswertung erfolgen, ob Punkte der Punktwolke in einem Teilbereich liegen und wenn, wie

viele (Abbildung 45). Entsprechend lässt sich identifizieren, welche Teilbereiche hergestellt sind. Der Algorithmus identifiziert auf dem Mehrheitsprinzip den hergestellten Bereich. Schicht<sub>4</sub> enthält zwischen Station 5 und 6 insgesamt zwei Punkte; in der untersten Schicht<sub>n</sub> werden in diesem Bereich sieben Punkte identifiziert, womit Schicht<sub>n</sub> zwischen Station 5 und 6 als hergestellt angenommen wird. Die rote Markierung verdeutlicht dies. Es empfiehlt sich die Unterteilung so vorzunehmen, dass diese sich auf gegebene Stationen zurückführen lässt. Weiteres kann dazu dem Prozess 2.2.2 *Integration Fertigstellungsgrad* entnommen werden. Beachtet werden sollten ebenso mögliche Fehlerquellen und deren Einbindung aus der aufgenommenen Punktwolke sowie die hergestellten Straßenschichten und die Einführung einer künstlichen Ober- und Untergrenze, wie im Prozess 2.1.2 *Vergleich Soll- zu Ist-Daten (Punktwolke zu Punktwolke)* dargestellt. Für eine Zuordnung der Punkte innerhalb der Schichten ist es erforderlich, die Punktwolke in negativer globaler z-Richtung (um die Hälfte der dünnsten Schicht) relativ zum Modell zu verschieben. Einzelne Punkte könnten ansonsten nicht innerhalb der Schicht liegen, sondern nur die Oberfläche abbilden.



**Abbildung 45: Schematische Darstellung der Auswertung 3D-Modell zu Punktwolke**  
 Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Marihal, 2021, S. 42; Vala, 2020, S. 56

### 2.2.1 Aktualisierung Arbeitskalkulation

Für die folgende Ermittlung der Leistung ist nach Abschnitt 2.1.5 die modifizierte Methode der KLR Bau vorzusehen. (Vgl. Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V., 2016, S. 107) Der darin enthaltene Ablauf ist branchenüblich etabliert und wird für die weitere Anwendung empfohlen. Eine Veränderung dessen wäre insoweit kontraproduktiv und ist nicht erforderlich. Hauptschritt ist die Bewertung der geleisteten Mengen auf Basis der Soll-Herstellkosten. Aufgrund des unabhängigen Vorgehens zur Rechnungsstellung (des prüfbaren Aufmaßes für den AG) und bez. der Forderungen aus der empirischen Studie (Kapitel 4) wird für die Berechnung der Prozess 2.1 *Bewertung des Fertigstellungsgrades* herangezogen. Die Soll-Herstellkosten werden aus dem Produktsystem (S. 104) und der gegebenen Arbeitskalkulation abgeleitet. Erforderlich sind deren Überprüfung und Aktualisierung (Anlage 11 – *Aktualisierung Arbeitskalkulation*). Abbildung 46 gibt den integrierten Prozess 2.2 *Modifizierte Leistungsbewertung der Leistungsermittlung der Ebene 2 des Handlungssystems* wieder.

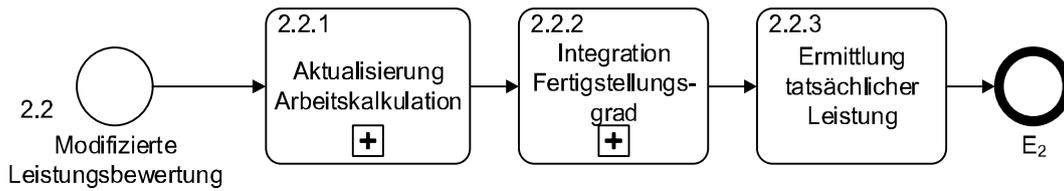


Abbildung 46: Modifizierte Leistungsbewertung – Ebene 2

Im Kontext der modellbasierten Projektabwicklung sind Auswirkungen durch Aktualisierung und Änderungen direkt dem BIM-Modell entnehm- oder damit durchführbar. Hervorzuheben ist bei der *Modifizierten Leistungsbewertung E<sub>2</sub>* die zu gewährleistende integrale Verknüpfung zwischen Zahlenwerten und Zeitbezügen. Die Korrelation von Kosten, Fertigstellungsgrad und dem zeitlichen Ablauf wird in Abschnitt 2.3 beschrieben sowie in der untersuchten Literatur (Abschnitt 2.1.6) und der empirischen Studie (Kapitel 4) gefordert.

### 2.2.2 Integration Fertigstellungsgrad

Die *Integration des Fertigstellungsgrades* ist für einen teilautomatisierten Prozess der bedeutendste Bestandteil. Es wird *2.1 Bewertung des Fertigstellungsgrades* herangezogen und für jede Schicht/jedes Bauteil analysiert und muss der zugehörigen Position der Arbeitskalkulation zugewiesen werden.

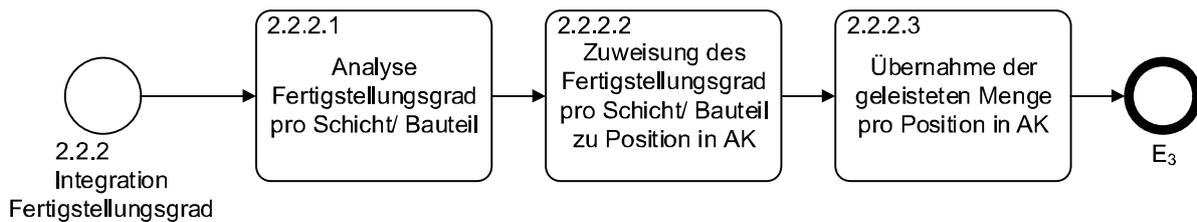
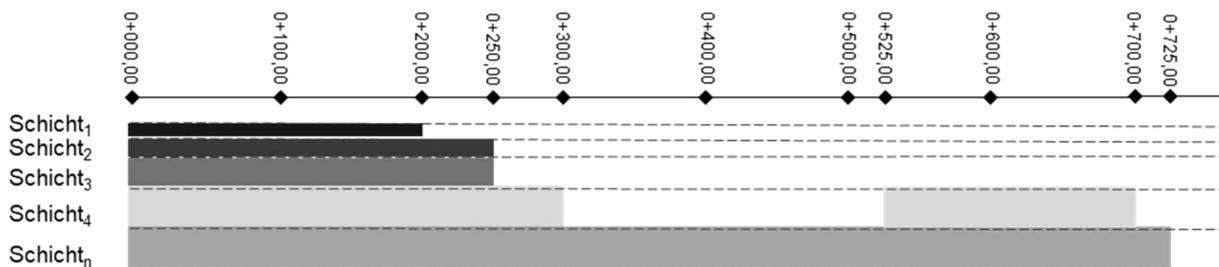


Abbildung 47: Integration Fertigstellungsgrad - Ebene 3

Die Besonderheit besteht darin, dass aus dem Prozess *2.1.2 Vergleich Soll- zu Ist-Daten (Punktwolke zu Punktwolke)* und *2.1.3 Vergleich Soll- zu Ist-Daten (3D-Modell zu Punktwolke)* keinerlei Semantik (aus Punktwolken) übermittelt wird. Für weitere Analysen ist dies jedoch erforderlich und musste für die eindeutige Zuweisung von Schicht/Bauteil entwickelt werden. In *2.1.2 Vergleich Soll- zu Ist-Daten (Punktwolke zu Punktwolke)* werden im letzten Schritt die Ist-Punkte den Soll-Daten zugewiesen. Die Soll-Daten stammen aus der Ableitung synthetischer Punktwolken und entsprechen den Soll-Daten des heranzuziehenden 3D-Modells (Soll-Daten). Somit lassen sich durch die eindeutige Zuordnung zu den Soll-Daten weitere Informationen zur/zum ermittelten Schicht/Bauteil entnehmen. In *2.1.3 Vergleich Soll- zu Ist-Daten (3D-Modell zu Punktwolke)* werden die einzelnen Punkte direkt in der jeweiligen georeferenzierten Schicht des 3D-Modells (Soll-Daten) identifiziert. Ebenfalls wird durch die eindeutige Zuordnung die weitere modellbasierte Auswertung sichergestellt. Die ermittelten Werte können eindeutig einer Schicht/einem Bauteil zugewiesen werden. Für die Verlinkung und Bereitstellung aller semantischen Daten ist eine zentrale Datenbank unabdingbar. Diese wird im vorliegenden Prozess als Soll-Daten[bank] beschrieben und stellt die Basis aller weiterführenden Untersuchungen dar. Mit dem Hinzufügen erfasster und aktualisierter Daten werden die Soll-Daten[bzw. wird die -bank] zu Ist-Daten[bzw. zur -bank] und stellen damit die Basis für weitere Vergleiche dar. Die Soll-Daten[bank] und Ist-Daten[bank] sind ein zentrales Element des Gesamtprozesses. (Anlage 12 – *Systemübergreifender Prozess der Bauleistungsfeststellung*)

Zu beachten ist im Produktsystem der baubetrieblich korrekte Aufbau des 3D-Modells (Soll-Daten) und dass der Aufbau der Bauteile (z. B. Frostschuttschicht) des 3D-Modells (Soll-Daten) in Einbauschichten nach jeweiliger Einbaustärke vorgenommen wird. Eine in der Planung erstellte zusammenhängende Schicht muss je nach Verdichtungsgrad in die maximale Einbaustärke unterteilt werden. Für 2.2.2.1 *Analyse Fertigstellungsgrad pro Schicht/Bauteil* wird ein Prozess integriert, welcher unabhängig vom angewandten Bauverfahren und der Baurichtung (in horizontaler Ausdehnung) den fertiggestellten Bereich wiedergibt und im direkten Zusammenhang mit 2.1.2 *Vergleich Soll- zu Ist-Daten (Punktwolke zu Punktwolke)* oder 2.1.3 *Vergleich Soll- zu Ist-Daten (3D-Modell zu Punktwolke)*, aus dem Prozess 2.1 *Bewertung des Fertigstellungsgrades*, steht. Aus dem Prozess 2.1.2 bzw. 2.1.3 werden die erkennbaren fertiggestellten Bereiche in achsenbezogenen Stationierungseinheiten<sup>5</sup> wiedergegeben. Diese beschreiben direkt den identifizierten Bereich – unabhängig von der jeweiligen Baurichtung oder von Unterbrechungen – sowie gleichzeitig hergestellte, voneinander unabhängige Bereiche (Abbildung 48). Schicht<sub>4</sub> ist entsprechend der Abbildung 48 von Station 0+000,00 bis 0+300,00 sowie von Station 0+525,00 bis 0+700,00 hergestellt (insgesamt 475,00 m).



**Abbildung 48: Schematische und exemplarische Darstellung nach Stationen zur Analyse des Fertigstellungsgrades pro Schicht/ Bauteil**

Mit Einführung dieser Entwicklung lassen sich stufenlos der Fertigstellungsgrad sowie Teilleistungen davon wiedergeben. Mit eindeutiger Zuweisung des Fertigstellungsgrades der gegebenen Soll-Daten aus dem Produktmodell können für jede Schicht/jedes Bauteil auf Basis der BIM Soll-Daten weitere Analysen und Berechnungen geführt werden. Abbildung 49 zeigt einen exemplarischen Ausschnitt der eingeführten Auswertung per visueller Programmierung und integriertem Python-Skript.

<sup>5</sup> Stationierungseinheit 0+000,00 (Beispiel: Station 1+345,50; dies bedeutet, die Station liegt bei 1 km, 345 m und 50 cm)

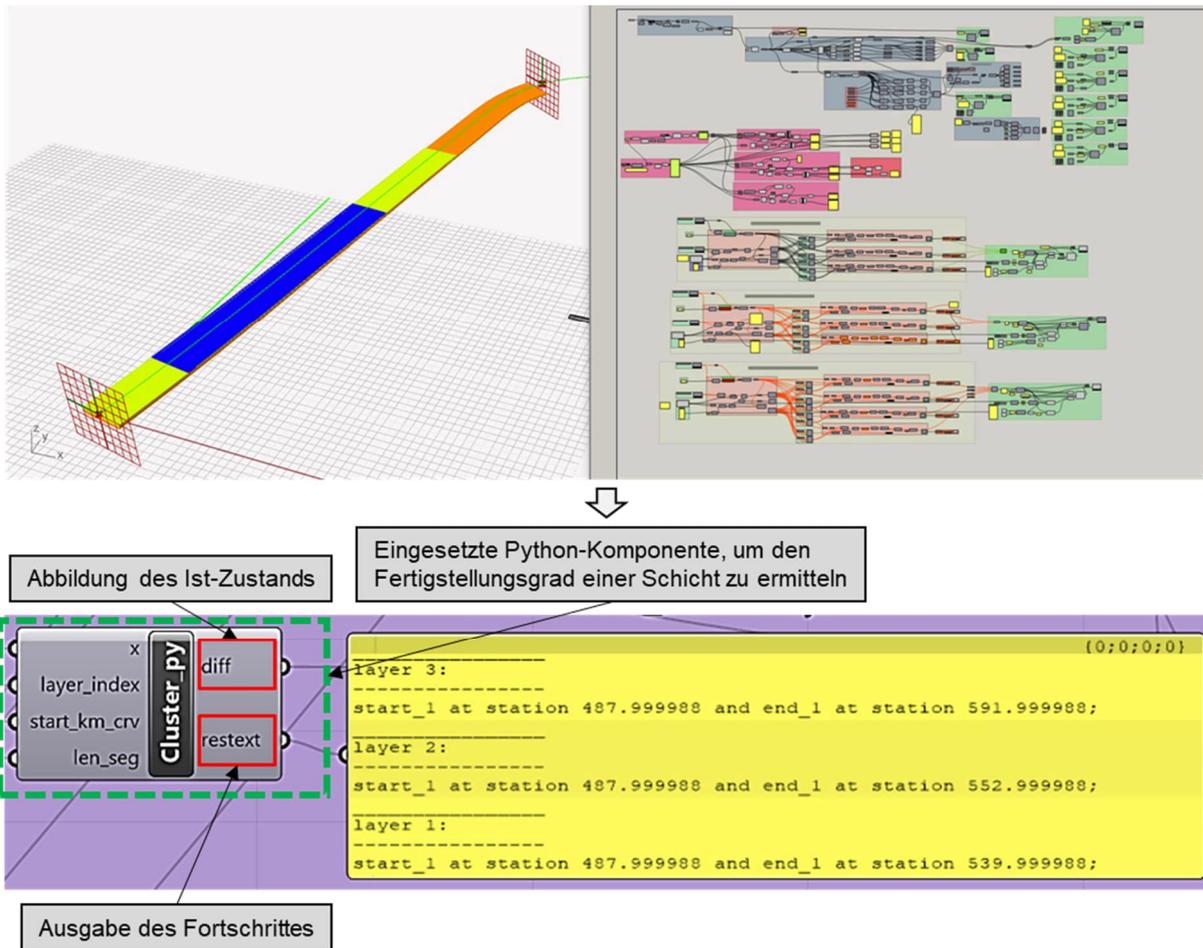


Abbildung 49: Exemplarische Darstellung zur Auswertung nach Stationierung

Aufgrund von Störungen im Bauablauf, Abweichungen in der Bauausführung oder nicht fachgerechten Ausführungen von Schichtübergängen kann es auf der Gesamtbreite der Ist-Trassierung vereinzelt zu unterschiedlichen Fertigstellungsgraden nach Stationierung kommen. In diesem Fall wird der Fertigstellungsgrad der Schicht übernommen – mit mehrheitlich zugeordneten Rasterzellen je Schicht. Dies ist variabel und könnte bspw. auch erst mit 100 %iger Zuordnung einer Schicht übernommen werden; sofern dies nicht erfüllt ist, wird die darunterliegende Schicht angenommen. Ist die Verteilung der Rasterzellen gleich, wird im vorliegenden Fall die untere Schicht festgelegt. Abbildung 50 zeigt exemplarisch die Auswahl der zutreffenden Schicht nach mehrheitlicher Zuordnung der Rasterzellen. Der Bereich zwischen Station 0+001,00 und 0+002,00 enthält 75 % grüncodierte Mittelpunkte einer Rasterzelle – somit wird dieser Bereich der Schicht 2 zugeordnet. Der nachfolgende Bereich von Station 0+002,00 bis 0+003,00 enthält 58 % grüncodierte Mittelpunkte und ist ebenfalls der zweiten Schicht zugeordnet.

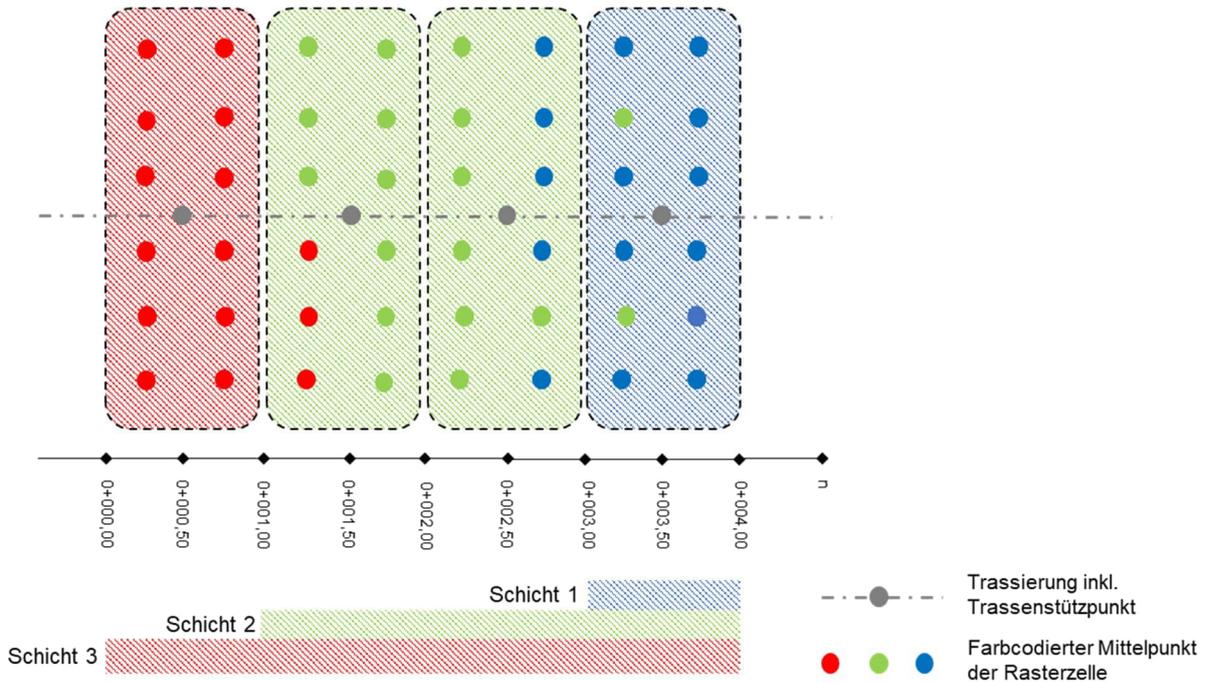


Abbildung 50: Exemplarische Darstellung mehrheitlich zugeordneter Rasterzellen

Betrachtet man die Auswertung in Abhängigkeit des Bauablaufplanes und analysiert vor- und nachgelagerte Prozesse, dann lässt sich mit diesem Vorgehen nicht nur die Herstellung einer Schicht/eines Bauteils nachweisen, sondern auch der Rückbau von Schichten. Entsprechend kann nach der Abbildung 48 (S. 120) die Schicht<sub>4</sub> zwischen Station 0+300,00 und 0+525,00 zurückgebaut worden sein. Eine eindeutige Identifizierung kann nur in Abhängigkeit des Ablaufmodells (4D-Modell) erfolgen. Ohne Abhängigkeit des Ablaufmodells wird zur Untersuchung des Fertigstellungsgrades eine sehr kurze Periode (z. B. täglich) empfohlen. Nur so kann dann (jedoch erst zur zweiten stattfindenden Untersuchung) festgestellt werden, ob der Fertigstellungsgrad pro Schicht zu- oder abnimmt und ggf. den Rückbau verkörpert. Der Rückbau ist nicht Teil dieser Untersuchung und wird entsprechend nicht weiter berücksichtigt. In Abhängigkeit des Ablaufmodells lassen sich ebenso weitere Bauteile/Objekte identifizieren. Jene Objekte/Bauteile, welche als Vorgänger in Verbindung zu einer Schicht stehen, können als hergestellt identifiziert werden. Als klassisches Beispiel ist die Herstellung von Entwässerungsleitungen zu benennen.

### 2.2.3 Ermittlung tatsächlicher Leistung

Die *Ermittlung tatsächlicher Leistung* basiert auf dem Prozess 2.2.1 *Aktualisierung Arbeitskalkulation* und 2.2.2 *Integration des Fertigstellungsgrades* zum Aufnahmezeitpunkt (1.2 *Aufnahmezeitpunkt festhalten*) der *Leistungserfassung  $E_1$* . Es wird die kalkulatorische Grundlage der modifizierten Methode nach KLR Bau übernommen. Das rechnerische Vorgehen kann Abschnitt 2.1.5 entnommen werden. Ergebnis sind korrekte Soll-Herstellkosten zu einem beliebigen Aufnahmezeitpunkt (inklusive des geplanten Deckungsbeitrags) sowie die Baustellengesamtleistung zu diesem Zeitpunkt. Aufgrund des neu entwickelten und implementierten Prozesses 1.1 *Aufnahme Bautenstand* und 2.1 *Bewertung Fertigstellungsgrad* kann eine genaue, jederzeit nachvollziehbare und fehlerreduzierte Baustellenleistung ausgegeben werden.

### 5.5.3 Prozess Leistungsmeldung des Handlungssystems

Nach dem Stand der Wissenschaft (Abschnitt 2.1.5) bedarf es für eine vollständige Aussage zur Baustellenleistung noch weiterer Aspekte, die in den vorherigen Kapiteln identifiziert wurden, an dieser Stelle jedoch nicht weiter betrachtet werden sollen. Zum einen unterliegen diese Aspekte bereits einer fundierten Analyse und effizienten Anwendung – und des Weiteren kann aus dem Stand der Wissenschaft (Kapitel 2) sowie der empirischen Studie (Abschnitt 4.1) ein erhöhter Forschungsbedarf im Sinne der Erkennung und automatisierten Übermittlung des Baufortschrittes bzw. Fertigstellungsgrades identifiziert werden. Folgende Aspekte werden deshalb nicht betrachtet.

- Materiallieferungen
- Nachunternehmerleistungen (sofern diese nicht dem Fertigstellungsgrad entsprechen)
- Minderungen aufgrund von Preisnachlässen
- Zu erwartende Rechnungsabstriche
- Übernahme von Leistungen durch den Auftraggeber (sofern diese nicht dem Fertigstellungsgrad entsprechen)
- Rückstellungen für zu erwartende Gewährleistungsarbeiten
- Veränderungen der Leistungen aus Gleitklauseln für Lohn oder Material (sofern diese sich nicht in der Aktualisierung der Arbeitskalkulation widerspiegeln)
- Rechnungsvorgriffe
- Lagerndes Material als Information zur Rechnungsabgrenzung

Dazu gehören auch Informationen zum Auftragsbestand, welche sich aus der Beauftragung von Nachträgen ergeben. Diese sind inkludiert, sofern diese in der Arbeitskalkulation enthalten sind und die zu erbringende Leistung im 3D-Modell (Soll-Daten) integriert wurde.

Aus dem Stand der Wissenschaft (Abschnitt 2.1.6) sowie aus der empirischen Studie geht hervor, dass Soll-Ist-Vergleiche aufgrund des engen Systemzusammenhangs Voraussetzung für eine fundierte Bauleistungsfeststellung sind. Nur so kann ausgewiesen werden, ob eine Maßnahme in der ausgewiesenen Zielgröße liegt. Im vorliegenden Fall entstammen die Zielgrößen dem Produktsystem (Abschnitt 5.3) und werden mittels Arbeitsinstrument des Handlungsträgersystem (Abschnitt 5.4) per BIM-Methodik wiedergegeben. Für die vergleichende Analyse der Ist-Daten kommt ebenfalls die BIM-Methodik zum Tragen. Es wird ein Prozess implementiert, der die aufgenommenen und ausgewerteten Ist-Daten des Fertigstellungsgrades (Abschnitt 5.5.2) automatisiert übernimmt und darstellt. Der gesamte Verlauf ist in Anlage 12 – *Systemübergreifender Prozess der Bauleistungsfeststellung* dargestellt. Anhand dieser Untersuchung ist nachzuvollziehen, ob der geplante Leistungsstand erreicht wurde.

Ebenso kann der Literatur (Abschnitt 2.1.6) sowie den Anforderungen aus der empirischen Studie (Kapitel 4) entnommen werden, dass bekannte Soll-Ist-Vergleiche einzeln und nicht in Korrelation stattfinden. Terminpläne werden auf ihre zeitlichen Zielvorgaben und die tatsächlich realisierten Termine überprüft – dies erfolgt analog für Kosten und auch Mengen. Ein Zusammenhang wird jedoch nicht hergestellt. In Abschnitt 2.3 wird bereits auf dessen Unabdingbarkeit eingegangen, weshalb im Prozess ein Soll-Ist-Vergleich der Kosten, der Mengen (Fertigstellungsgrad) sowie des Bauablaufes in Korrelation auf Basis der BIM-

Methodik integriert wurde. So bedeutet die hier ermöglichte vergleichende modellbasierte Betrachtung der Soll- und Ist-Werte mittels integraler Verknüpfung zwischen Zeit- und Zahlenwerten einen weiteren Fortschritt bei der tatsächlichen Bauleistungsfeststellung. Der Prozess (Abbildung 51) beinhaltet die vollständige Integration der Soll-Daten auf Basis aller notwendigen Aktualisierungen. Die Ist-Daten stammen aus den Aufnahmen vor Ort. Mit dem Vergleich des 3.1.1 *Soll* und 3.1.2 *Ist* ist eine Vorausschau des zu erwartenden, linear berechneten Bauendes sowie der linear berechneten Kosten möglich.

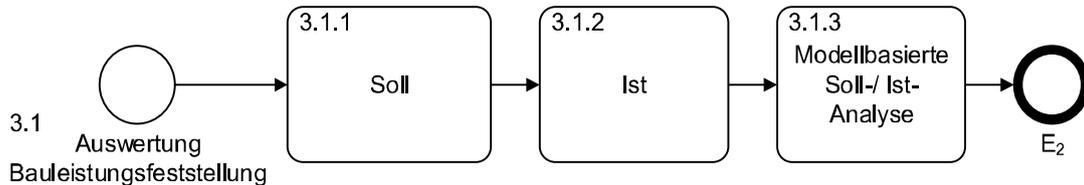


Abbildung 51: Auswertung Bauleistungsfeststellung – Ebene 2

### 3.1.1 *Soll*

Das 3.1.1 *Soll* wird auf Basis von Plan-Daten und deren Aktualisierung erstellt. Hierbei wird der Prozess modellbasiert integriert, was bedeutet, dass ein 3D-Modell in Verbindung mit dem Bauzeitenplan steht und für die Bauteile sowie in Korrelation stehenden Vorgänge mit der aktuellen Arbeitskalkulation verknüpft sind. Somit können zu einem Zeitpunkt x sowohl der zu erreichende Bautenstand als auch die bis dato anfallenden Soll-Kosten dargestellt werden. Alle Informationen und Werte sind den Soll-Daten[bzw. der -bank] zu entnehmen.

### 3.1.2 *Ist*

Das 3.1.2 *Ist* enthält den tatsächlichen Bautenstand zu einem beliebigen Zeitpunkt (Aufnahmezeitpunkt). Damit und mit der integralen Verknüpfung zur aktualisierten Arbeitskalkulation kann der Leistungsstand der Baustelle ermittelt werden. Ebenso kann darauf aufbauend festgestellt werden, ob man sich im zeitlichen Soll befindet oder ggf. schneller bzw. langsamer voranschreitet. Die Besonderheit beruht auf der entwickelten Basis und 2.2.2 *Integration des Fertigstellungsgrades*, welcher für die Schichten/Bauteile übernommen wird. Die Angabe, welche Schicht/welches Bauteil von Station zu Station existiert, ist elementar, um auf dieser Basis die erforderlichen Mengen abzuleiten und mit den Soll-Kosten der Arbeitskalkulation zu multiplizieren. Die zu übernehmenden Mengen basieren auf 2.1 *Bewertung des Fertigstellungsgrades* und der nach Stationierung ermittelten Länge, welche mit dem zugrunde liegenden 3D-Modell (Soll-Daten) die resultierenden Mengen ergeben. Dieser Vorgang unterliegt ebenso der modellbasierten Abwicklung, womit ein Ist-Modell ausgegeben werden kann, welches einen objektiven Status der Baustelle wiedergibt und die entstandenen Kosten in Korrelation von Baufortschritt und zeitlicher Komponente widerspiegelt.

### 3.1.3 *Modellbasierte Soll-Ist-Analyse*

Die *Modellbasierte Soll-Ist-Analyse* hebt die ggf. eruierte Differenz des 3.1.2 *Ist* zu dem geforderten 3.1.1 *Soll* hervor. Dies erfolgt nicht in einzelnen Vergleichen wie bisher, sondern durch einen in Korrelation mit anderen Faktoren stehenden Vergleich. Kosten, Termine und der Bautenstand werden in Abhängigkeit zueinander betrachtet. Diese Ergebnisse können durch diverse Dashboard-Applikationen grafisch aufbereitet und visualisiert werden. Eine

Lösung wurde gemeinsam mit Rolf entwickelt und umgesetzt (Vgl. Rolf, 2021, S. 50 ff.), weshalb in der vorliegenden Arbeit nicht weiter darauf eingegangen wird.

### *3.2.1 Interpretation der Auswertung*

Sofern alle Daten ausgewertet und die Ergebnisse dargestellt sind, hat die Analyse und Interpretation durch eine für das Projekt verantwortliche und entscheidungsberechtigte Person zu erfolgen. Diese prüft die ausgewerteten Ergebnisse auf Plausibilität.

### *3.2.2 Festlegen weiterer Vorgehensweise*

Wurden die ausgewerteten Werte auf Plausibilität überprüft und diesen zugestimmt, ist das weitere Vorgehen je nach Ergebnis festzulegen. Sind die Werte in Ordnung und entsprechen dem angedachten Soll, so werden keine essenziellen Maßnahmen erforderlich sein. Sollten die Werte jedoch größere Abweichungen zeigen, sind daraus Folgemaßnahmen abzuleiten (Abschnitt 2.1.6).

## **5.6 Systemzusammenhang und integrierte Datenverarbeitung innerhalb des Modells**

Im Zuge des Prozesses der Bauleistungsfeststellung stehen alle Subsysteme zueinander in Verbindung. Dem Produktsystem können alle wichtigen Informationen und Soll-Vorgaben zur Umsetzung des Bauvorhabens entnommen werden. Über das Handlungsträgersystem wird das Handlungssystem beeinflusst. Es bildet die organisatorischen Einheiten ab sowie die zu implementierenden Arbeitsinstrumente. Ändert sich eine dieser Variablen oder kommen Arbeitsinstrumente hinzu, dann ändert sich automatisch der Prozess, da beispielsweise auf andere Personen oder auf andere Arbeitsinstrumente prozesstechnisch eingegangen werden muss. Das Zielsystem wirkt auch dann auf das Handlungssystem, wenn sich die Anforderungen und Zielvorgaben ändern. Für den vorliegenden Untersuchungsgegenstand kann der Systemzusammenhang schematisch der nachfolgenden Abbildung 52 entnommen werden. Die ausführliche Beschreibung des entwickelten Ansatzes und seines systemübergreifenden Prozesses ist der Anlage 12 – *Systemübergreifender Prozess der Bauleistungsfeststellung* zu entnehmen.

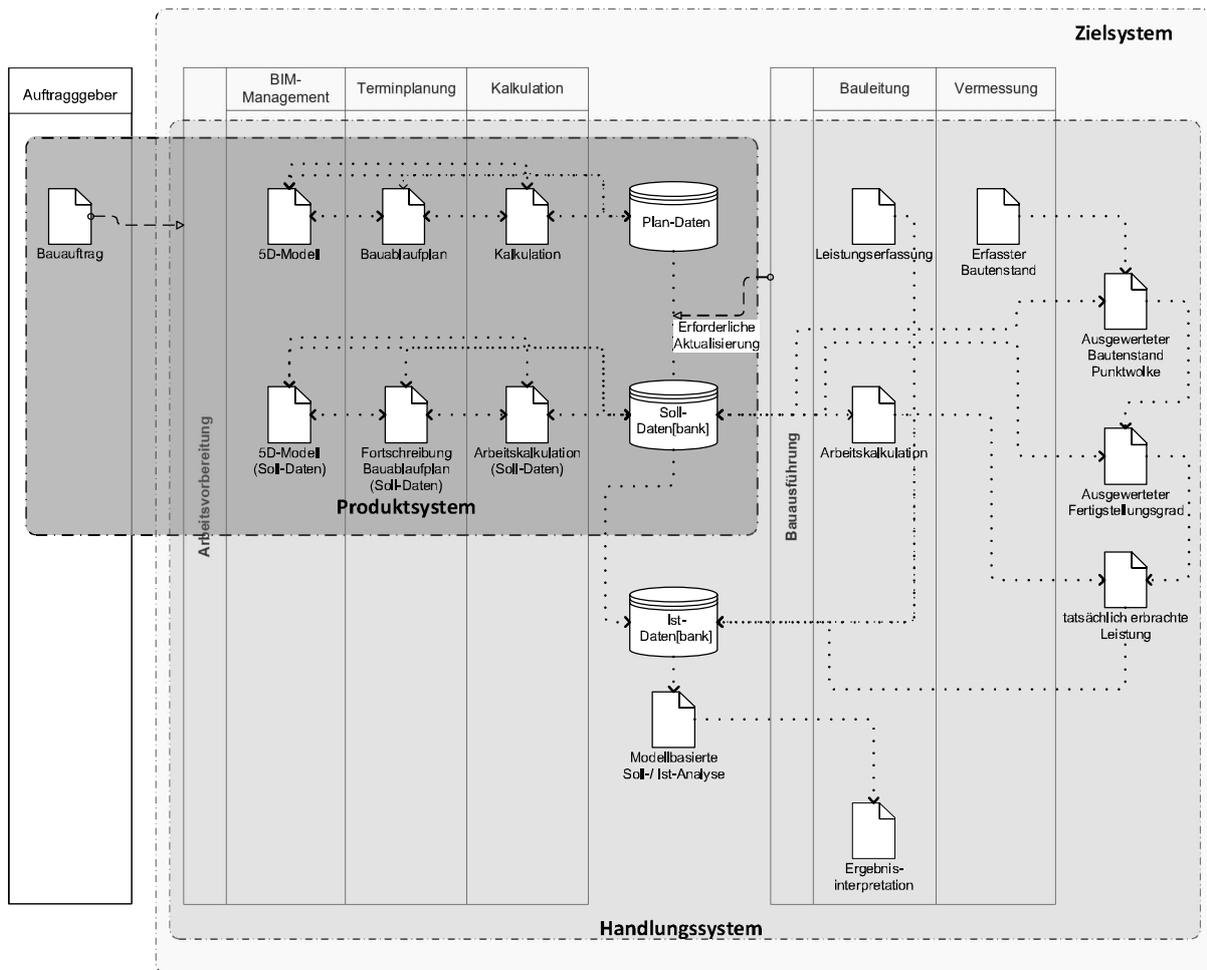


Abbildung 52: Schematischer Aufbau Systemzusammenhang

## 5.7 Zusammenfassende Beschreibung

Das vorgestellte Lösungskonzept zur Bauleistungsfeststellung ist allgemeingültig. Es strukturiert und ordnet alle Einflüsse, Ziele und Prozesse der Bauleistungsfeststellung unter den genannten Abgrenzungen. Das Modell gibt dem Unternehmen und dort dem Bauprojektmanagement die Basis für eine zweckmäßige und bedarfsgerechte Gestaltung zur Umsetzung der Bauleistungsfeststellung für die gewählte Zielgruppe. Das Modell dient als Hilfestellung und kann unternehmensintern in allen Systemen angepasst werden. Ebenso besteht die Möglichkeit, weitere Aspekte zu integrieren. So kann bspw. der abgegrenzte Bereich der Ist-Kosten der kaufmännischen Abteilungen im Prozess integriert werden. Unter Berücksichtigung der Interoperabilität lassen sich andere Arbeitsinstrumente integrieren oder softwaretechnische Lösungen herausarbeiten.

Das Modell bildet ein Verfahren ab, das die Feststellung der Bauleistung unter einem zukunftsweisenden, digitalisierten und BIM-orientierten Prozess abwickelt. Aufgrund der wiederkehrenden gleichen Muster der Prozesse wird Transparenz gewährleistet. Das Modell wurde so konzipiert, dass es unabhängig von einer bestimmten Software ist. Somit wird gewährleistet, dass die Einführung des digitalen und BIM-orientierten Prozesses sukzessiv, softwareunabhängig und anpassbar an den bestehenden Kenntnisstand erfolgen kann.

Das dargestellte Lösungskonzept dient der Beantwortung der Forschungsleitfrage F1 nach der zweckmäßigen und bedarfsgerechten Gestaltung einer automatisierten Leistungsfeststellung

für die gewählte Zielgruppe. Des Weiteren ist dem vorliegenden Lösungskonzept der Systemzusammenhang der Datenverarbeitung zu entnehmen. Dies ist im Detail den einzelnen entwickelten Prozessen sowie dem Gesamtprozess entnehmbar. Somit konnte entsprechend der Forschungsfrage F1.3 (Abschnitt 1.3) ein Weg aufgezeigt und aufbereitet werden, der sich im Gesamtsystem integrieren lässt. Im Ergebnis beschreibt das Lösungskonzept die Integration einer digitalisierten, BIM-orientierten Bauleistungsfeststellung aus Prozess-, Organisations- und Datensicht. Der prototypische Ansatz wird im nachfolgenden Kapitel 6 visualisiert. In Kapitel 7 erfolgt die Evaluierung des Lösungskonzeptes anhand der priorisierten Anforderungen des Kapitels 4.

## 6 Validierung und prototypische Überprüfung der Anwendbarkeit

### 6.1 Validierung des aufgestellten Modells

Für eine erfolgreiche modellbasierte Arbeitsweise sind die Prozesse des Handlungsträger-, des Handlungs- und des Produktsystems so auszugestalten, dass verschiedene semantische heterogene, de- bzw. präskriptive Fachmodelle zu einer durch die unterschiedlichen Projektrollen individuell nutzbaren Datenbasis verflochten werden. (Vgl. Heyl, 2019, S. 75)

Das entwickelte Lösungskonzept ordnet die erforderlichen Prozesse, Daten und Vorgehen den einzelnen Projektbeteiligten zu. Diese können aus dem zugeordneten Fachmodell – ohne Einschränkung durch andere Beteiligte – die für sie notwendigen Daten erstellen und abrufen. Weitere Anpassungen führen zu aktualisierten bereitgestellten Informationen für alle Projektbeteiligten. Damit wird eine individuell nutzbare Datenbasis für die einzelnen Projektrollen geschaffen. Durch den Systemzusammenhang und die integrierte Datenverarbeitung (Abbildung 52) sowie Verknüpfung der Daten untereinander wird die modellbasierte Arbeitsweise unterstützt. Resultat ist eine durchgängig digital unterstützte Wertschöpfungskette (Abschnitt 2.2.5).

Modellinhalte sollen fehlerfrei sowie zielgruppenorientiert verfasst und verwendet werden können. Sechs Grundsätze (Grundsätze ordnungsgemäßer Modellierung – GoM) sichern die Qualität von Prozessmodellen und lauten wie folgt:

- Grundsatz der Richtigkeit
- Grundsatz der Relevanz
- Grundsatz der Wirtschaftlichkeit
- Grundsatz der Klarheit
- Grundsatz der Vergleichbarkeit
- Grundsatz des systematischen Aufbaus

(Vgl. Gadatsch, 2017, S. 126 f.; Koch, 2015, S. 49 ff.)

Der Grundsatz der *Richtigkeit* ist erfüllt, da das Modell der Realität gegenüber verhaltensneutral und anwendbar ist. Mit der erforderlichen Zuweisung der Prozesse und Aufgaben zu den auszuführenden organisatorischen Einheiten und Personen ist das Modell in die Realwelt übertragbar. Die Integration eines neu entwickelten Ansatzes zur Datenaufnahme und Auswertung in den bestehenden Gesamtprozess der Bauleistungsfeststellung dient der Richtigkeit. Alle Handlungsschritte des Modells sind vollumfänglich nachvollzieh- und in der realen Welt abbildbar. Die Abschnitte 5.2 bis 5.6 geben dies unter Einhaltung der benannten Kriterien wieder.

Zur Erfüllung der *Relevanz* werden nur jene Teile der Realität im Modell abgebildet, welche für die Zielsetzung des Modells erforderlich sind. Das entwickelte Modell enthält alle relevanten Aspekte zur Umsetzung der Bauleistungsfeststellung per Luftbildaufnahmen von Linienbaustellen. Alle relevanten Mindestanforderungen an das Modell stehen in Kapitel 4 (S. 84). Die aus der Studie erhobenen Anforderungen wurden thematisch strukturiert und mit den Ergebnissen der Literaturrecherche abgeglichen. Aufbauend erfolgte eine Priorisierung mit dem Ziel einer hohen Gebrauchs- und Praxistauglichkeit des Modells.

Die *Wirtschaftlichkeit* des Modells ist in der vorliegenden Arbeit durch die Priorisierung der Anforderungen (Kapitel 4) gegeben. Somit wird gewährleistet, dass die gesteckten Ziele im notwendigen und optimalen Detaillierungsgrad erarbeitet werden, aber nicht über dessen Detaillierung hinausgehen und keinen Mehrwert für die organisatorischen Einheiten darstellen, da die dann bereitgestellten Informationen den Fachbereichen bereits bekannt sind. Zum anderen ergibt sich der Nutzen der optimierten Bauleistungsfeststellung durch die modellbasierte Unterstützung. Durch teilweise automatisierte Prozesse und Auswertungen, die eine objektive Bewertung des Bautenstandes zulassen, sinken das Risiko von Fehleinschätzungen. Mit der Visualisierung der objektiven Auswertung wird zu einem besseren Verständnis der tatsächlichen Baustellen-Ist-Situation beigetragen.

Der Grundsatz der *Klarheit* stellt sich durch die Einteilung des Modells in die vier verschiedenen Systeme (Kapitel 5) und durch deren aufgeführte einzelne Teilprozesse (Abschnitt 5.5) ein. Somit ergeben sich für jeden Anwender eine klare Struktur und eine bestmögliche Anschauung, die unter Zusammenführung das Modell zur optimierten Bauleistungsfeststellung abbilden.

Ein Vergleich ist durch die systematisch angewandte Notation der BPMN nach ISO/IEC 19510:2013-07, 2013 gegeben. Somit wird die *Vergleichbarkeit* zu anderen Modellierungsrichtlinien und Notationen gewahrt.

Alle Teilprozesse werden in einer Gesamtansicht integriert und zu einem Modell zusammengeführt (Anlage 12 – Systemübergreifender Prozess der Bauleistungsfeststellung). Mit der konstanten Modellierung, Zusammenführung der einzelnen Prozesse und organisatorischen Einbindung ist der Grundsatz des *systematischen Aufbaus* nachgewiesen gegeben.

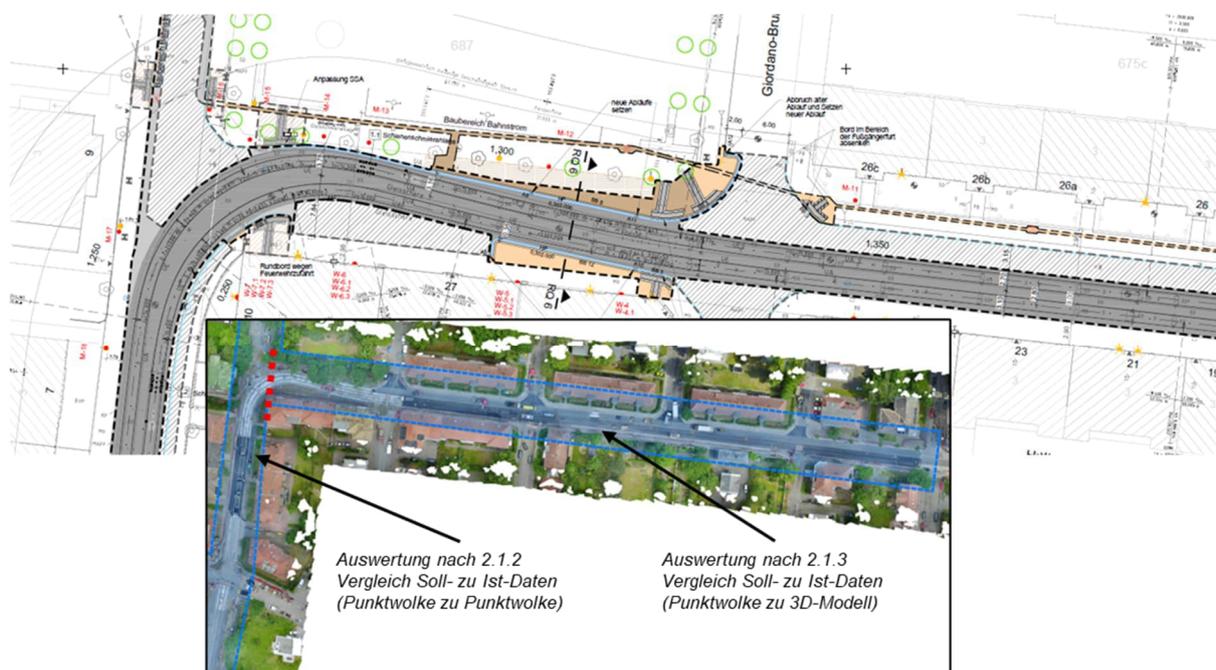
Nach den vorangestellten sechs Kriterien der GoM ist das hier entwickelte Modell zur Optimierung der Bauleistungsfeststellung im Infrastrukturbau geeignet.

## **6.2 Prototypische Überprüfung der Anwendbarkeit am Beispiel**

Die Anwendbarkeit des entwickelten Modells wird anhand praktischer Szenarien überprüft. Die Teilsysteme werden hierbei auf ihre Interoperabilität getestet. Das Modell kann als Ausgangsbasis und Handlungsempfehlung eingesetzt werden. Jedes Bauunternehmen kann das Modell in Gänze oder auch nur in Teilen nach unternehmensinternen Vorstellungen individuell implementieren. Der Einsatz der Arbeitsmittel und der Softwarelösungen bleibt ebenso individuell gestaltbar.

### **6.2.1 Erfassung und Auswertung des Fertigstellungsgrades zur Integration der modellbasierten Bauleistungsfeststellung**

Ausgangslage ist eine Punktwolkenaufnahme einer innerstädtischen Linienbaustelle, anhand derer der tatsächliche Fertigstellungsgrad ermittelt werden soll. Die Beispielsituation umfasst die Herstellung des Straßenoberbaus einer zweispurigen städtischen Fahrbahn unter realen Bedingungen (Abbildung 53).

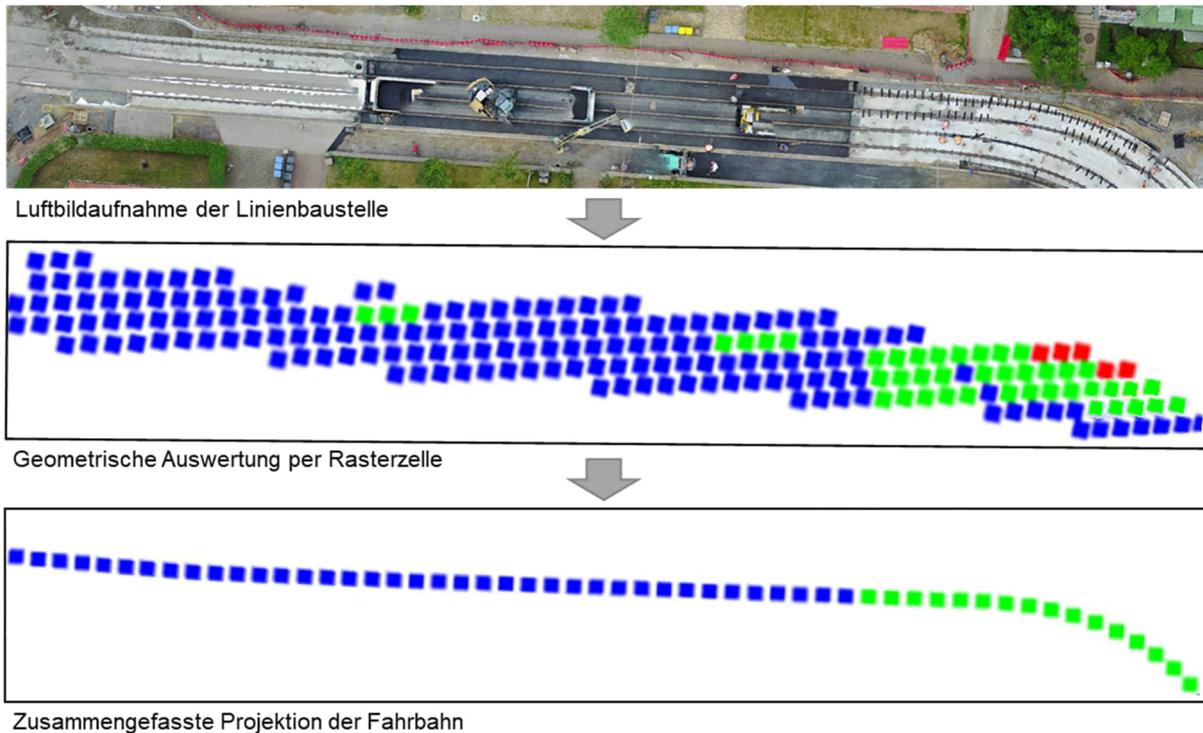


**Abbildung 53: Lageplan und Punktwolkenaufnahme des Beispielszenarios**

Erste Ergebnisse wurden bereits in einer eigenen Veröffentlichung (Vgl. Ellinger und Walther, 2021) des entwickelten Prototyps verifiziert, der Öffentlichkeit präsentiert und diskutiert.

#### *Auswertung des Prozesses Vergleich Soll- zu Ist-Daten (Punktwolke zu Punktwolke)*

Die Strecke wurde sowohl auf Basis synthetischer Daten als auch mit realen Daten getestet. Die synthetischen Daten (Soll-Daten) wurden dabei, wie in Abschnitt 5.5.2 beschrieben, zur Validierung und Referenz der geometrischen Komponente verwendet. Die nachfolgende Abbildung 54 zeigt einen exemplarischen Ausschnitt der Auswertung von rund 100 m der Baustelle. Die gesamte Maßnahme erstreckt sich über 441,65 m (Station 0+165,85 bis 0+607,50) und steht kurz vor Einbau der Deckschicht. Die Auswertung für den exemplarischen Bereich zeigt, dass circa zwei Drittel der Tragschicht (blau) und circa ein Drittel des Unterbaus (grün) hergestellt sind. Anhand der Luftbildaufnahme ist im Bereich der Tragschicht ein heller und dunkler Bereich visuell identifizierbar. Der dunkle Bereich zeigt die bereits aufgebrachte Bitumenemulsion, die eine bessere Haftung der unterschiedlichen Schichten gewährleistet. Die Emulsion ist eine flüssige kleberartige Masse, welche aus Wasser und Straßenbaubitumen besteht. Die Emulsion weist keine extra Schichtstärke auf und wird daher nicht als einzelne Schicht erkannt.



**Abbildung 54: Darstellung der Auswertung des Prozesses Vergleich Soll- zu Ist-Daten (Punktwolke zu Punktwolke)**

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Ellinger und Walther, 2021, S. 349

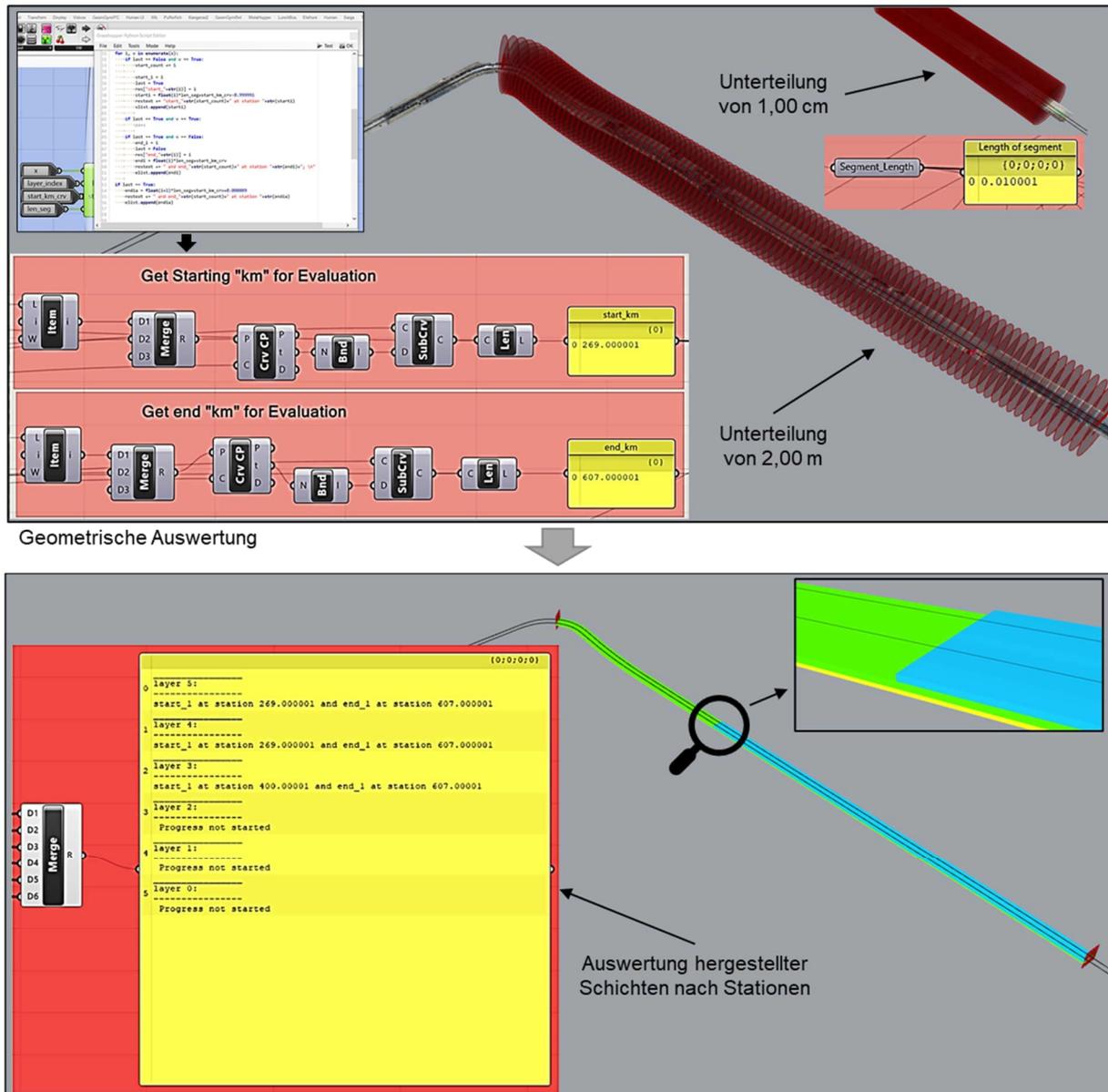
Zur vollständigen Auswertung des Fertigstellungsgrades werden für die identifizierten Schichten die Stationierungen der hergestellten Bereiche ausgegeben. Der dargestellte Bereich entspricht der Baukilometrierung von 0+165,85 bis 0+269,00 (103,15 m) und enthält zwei unterschiedliche Schichtenaufbauten. (Abbildung 55)

Schichtenaufbau 0+165,85–0+216,25		hergestellter Bereich	
		Startstation	Endstation
4,0 cm	Asphaltdeckschicht MA 8 S, 20/30 (Gussasphalt)	-	-
5,0 cm	Asphaltbinder AC 16 BS, 25/55-55	-	-
10,0 cm	Asphalttragschicht AC 22 TS, 50/70	-	-
43,5 cm	Schottertragschicht 0/45	0+165,85	0+216,25
20,0 cm	FSS 0/45 EV2≥120MPa	0+165,85	0+216,25
15,0 cm	Magerbetonschicht	0+165,85	0+216,25
97,5 cm	Gesamtaufbau auf Planum EV2≥ 45 MPa		
Schichtenaufbau 0+216,25– 0+269,00		hergestellter Bereich	
		Startstation	Endstation
3,5 cm	Asphaltdeckschicht MA 8 S, 20/30 (Gussasphalt)	-	-
6,0 cm	Asphaltbinder AC 16 BS, 25/55-55	-	-
9,5 cm	Asphalttragschicht AC 22 TS, 50/70	-	-
25,0 cm	Betontragschicht C 30/37	0+216,25	0+269,00
20,0 cm	FSS 0/45 EV2≥120MPa	0+216,25	0+269,00
15,0 cm	Magerbetonschicht	0+216,25	0+269,00
79,0 cm	Gesamtaufbau auf Planum EV2≥ 45 MPa		

**Abbildung 55: Auswertung Fertigstellungsgrad von 0+165,85 bis 0+269,00**

*Auswertung des Prozesses Vergleich Soll- zu Ist-Daten (3D-Modell zu Punktwolke)*

Auf Basis der Variante 2.1.3 Vergleich Soll- zu Ist-Daten (3D-Modell zu Punktwolke) wurde die Maßnahme von Station 0+269,00 bis 0+607,00 (338,00 m) zum Bauende untersucht (Abbildung 56). Zur besseren Visualisierung wurde exemplarisch eine Unterteilung von 2,00 m gewählt, um die untersuchte Linienbaustelle im Hintergrund visuell noch zu erkennen. Untersuchung und Auswertung sollten zur Sicherstellung der Lagengenauigkeit nach ATV DIN 18135, 18136 und 18137 in einem Abstand von  $\leq 3,00$  cm erfolgen. (Vgl. VOB, 2019, S. 331 ff.) Ebenfalls wurde die Unterteilung in einem Detailliertheitsgrad bis zu einem 1,00 cm analysiert, um auch nachzuweisen, dass höhere Anforderungen gewährleistet werden können.



Zusammengefasste Projektion und Auswertung der Schichten nach Stationen

**Abbildung 56: Darstellung der Auswertung des Prozesses Vergleich Soll- zu Ist-Daten (3D-Modell zu Punktwolke)**

Für die Auswertung der erfassten Punktwolke nach den entwickelten Prozessen 2.1.2 Vergleich Soll- zu Ist-Daten (Punktwolke zu Punktwolke) und 2.1.3 Vergleich Soll- zu Ist-Daten (3D-Modell zu Punktwolke) empfiehlt sich eine geeignete Größenordnung zu wählen (Abschnitt 5.5.2 – 2.1.1 Vereinheitlichung Punktwolke). Die Gesamtstrecke umfasste nach

dem Prozess 1.1.3 *Auswertung der Daten* 3.368.220 Punkte. Durch den Prozess 2.1.1 *Vereinheitlichung der Punktwolke für den Straßenbau* wird die Datenmenge, in Abhängigkeit der gewählten Voxelgröße, nochmals reduziert. Trotz dieser Datenreduzierung empfiehlt sich bei größeren Strecken die Einteilung der Auswertung in mehrere Abschnitte.

Für die identifizierten Schichten werden jeweils die Start- und Endstation ausgegeben. Sie entsprechen der Baukilometrie und sind somit eindeutig. Exemplarisch zeigt dies Abbildung 57.

Schichtenaufbau 0+269,00 – 0+607,00		hergestellter Bereich	
		Startstation	Endstation
3,5 cm	Asphaltdeckschicht MA 8 S, 20/30 (Gussasphalt)	-	-
6,0 cm	Asphaltbinder AC 16 BS, 25/55-55	-	-
9,5 cm	Asphalttragschicht AC 22 TS, 50/70	-	-
25,0 cm	Betontragschicht C 30/37	0+400,00	0+607,00
20,0 cm	FSS 0/45 EV2≥120MPa	0+269,00	0+607,00
15,0 cm	Magerbetonschicht	0+269,00	0+607,00
79,0 cm	Gesamtaufbau auf Planum EV2≥ 45 MPa		

**Abbildung 57: Auswertung Fertigstellungsgrad von 0+269,00 bis 0+607,00**

Die Ergebnisse sind zum einen durch die visuelle Überprüfung vor Ort (anhand der vorhandenen Baukilometrierung und zu den gegebenen Aufnahmezeitpunkten) sowie zum anderen durch die visuelle Überprüfung von Orthophotos aus durchgeführtem Drohnenflug bestätigt worden. Mit beiden digitalisierten Verfahren (*Punktwolke zu Punktwolke* und *3D-Modell zu Punktwolke*) lässt sich somit der Fertigstellungsgrad des Schichtenaufbaus einer Linienbaustelle objektiv festhalten und nach Stationen auswerten.

Die Aufnahmen wurden als Auflösung und Messgenauigkeit eines GSD-Wertes von 2 cm durchgeführt. Das liegt innerhalb der erlaubten Fertigungstoleranzen der profilgerechten Lage von Oberbauschichten ohne Bindemittel ( $\leq 4,00 \text{ cm}^6$ ), Oberbauschichten mit hydraulischen Bindemitteln ( $\leq 3,00 \text{ cm}^7$ ) und von gebundenen Oberbauschichten aus Asphalt ( $\leq 3,00 \text{ cm}^8$ ) gewährleistet.

Nachteilig im Verfahren 2.1.3 *Vergleich Soll- zu Ist-Daten (3D-Modell zu Punktwolke)* können durch das Verschieben der Punktwolke in z-Richtung sehr hohe oder auch sehr dünne Schichtenaufbauten sein. Punkte, die sehr nah an den Grenzen der unterschiedlichen Schichten liegen, könnten aufgrund von Ungenauigkeiten falsch zugeordnet werden. Ausschlaggebend ist daher eine möglichst hohe Messgenauigkeit in z-Richtung und deren präzise Auswertung. In den vorliegenden Untersuchungen konnten aufgrund der gewählten Genauigkeit alle Zuordnungen richtig erfolgen. Sofern Fehler in der Zuordnung festzustellen sind, sollte die Auswertung nach dem Verfahren 2.1.2 *Vergleich Soll- zu Ist-Daten (Punktwolke zu Punktwolke)* erfolgen. Der dafür vorgesehene Algorithmus (Abbildung 40) schließt eine falsche Zuordnung der aufgenommenen Punkte aus.

<sup>6</sup> VOB, 2019, S. 331

<sup>7</sup> VOB, 2019, S. 346

<sup>8</sup> VOB, 2019, S. 360

## 6.2.2 Überprüfung der modellbasierten Anwendbarkeit

Die Überprüfung der Anwendbarkeit im Abschnitt 6.2.1 und dessen Auswertung erfolgten modellbasiert für den Schichtenaufbau anhand einer 29 km langen Ausbaustrecke (geteilt in fünf Bauabschnitte) der Bundesautobahn 7 (Abbildung 58). Die Besonderheit liegt in einer hohen Anzahl verschiedener Querschnitte und Schichtenaufbauten des herzustellenden Straßenkörpers.



Abbildung 58: Ausschnitt des Modells der Bundesautobahn 7

Ausgangslage dieses Projektes sind Soll-Daten als einzelne Komponenten. Es liegen eine Arbeitskalkulation, ein Bauzeitenplan sowie 2D-Planungen vor. Dies wurde zunächst modellbasiert aufgearbeitet sowie in eine zentrale Datenbank implementiert, die alle notwendigen Informationen und deren Verlinkung zur Schicht/zum Bauteil des 3D-Modells enthält. Tabelle 15 greift dies am Beispiel eines Straßenabschnitts mit neun Schichtbereichen auf und zeigt einen exemplarischen Ausschnitt der Soll-Daten[bank]. Diese zeigt den jeweils herzustellenden Stationsbereich (Spalte C und D) und aus dem 3D-Modell abgeleitete Längen, Flächen und Volumina (Spalte E bis G) ebenso wie die bis zum Zieltermin zu erreichenden Soll-Maße des Bauteils, welche in den Spalten H bis J ausgewiesen sind.

Tabelle 15: Ausschnitt zu implementierender Datenbank

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
	GUIDs	Name	Station von_(Soll)	Station bis_(Soll)	Länge_(Soll) m	Flächen_(Soll) m <sup>2</sup>	Volumen_(Soll) m <sup>3</sup>	4D_Länge m	4D_Fläche m <sup>2</sup>	4D_Volumen m <sup>3</sup>
1	{3FD872BC-8DD4-422D-8AEE-1D6793E83D32}	Frostschuttschicht BAB-km 222+143 bis 223+772	222143	223772	1629,00	32164,12	6459,98	1629,00	32164,12	6459,98
2	{42719EC2-6B07-442C-8883-AA9E9C225718}	Schottertragschicht BAB-km 222+143 bis 223+772	222143	223772	1629,00	26458,30	5188,12	1629,00	26458,30	5188,12
3	{A8DCEB49-0EC6-4F3A-AC31-77B0851D8E75}	Tragschicht_Lage1 BAB-km 222+143 bis 223+772	222143	223772	1629,00	24852,93	2221,83	1629,00	24852,93	2221,83
4	{629A53A3-B5D6-4A8C-92CF-11CFF17B486A}	Tragschicht_Lage2 BAB-km 222+143 bis 223+772	222143	223772	1629,00	24852,93	2221,81	1629,00	24852,93	2221,81
5	{1F9C1048-8095-40B1-9243-4943284E2F27}	Binderschicht BAB-km 222+143 bis 223+772	222143	223772	1629,00	24734,30	1965,93	1629,00	24734,30	1965,93
6	{F0364A37-0896-4846-BA90-85DCD6C2E1D2}	Bankett_Außen BAB-km 222+143 bis 223+772	222143	223772	1629,00	3502,64	1148,22	1629,00	3502,64	1148,22
7	{EEAB9D2A-6E65-462B-A812-352CF2C1E2A8}	Bankett Innen BAB-km 222+143 bis 223+772	222143	223772	1629,00	1522,93	355,04	1629,00	1522,93	355,04
8	{BCDA80E7-BD8D-4CE4-A133-95CF2E855F83}	Füllboden BAB-km 222+143 bis 223+772	222143	223772	1629,00	2666,55	357,62	1629,00	2666,55	357,62
9	{FCAB9D1A-63A1-4DA0-B2CF-61C5995E8391}	Oberbodenauftrag Randbereich BAB-km 222+143 bis 223+772	222143	223772	1629,00	18117,97	1686,56	1629,00	18117,97	1686,56
10	{B9C860B1-7E5A-443B-B5E0-DAD4638919EA}	Oberbodenauftrag Mittelstreifen BAB-km 222+143 bis 223+772	222143	223772	1629,00	1710,37	676,82	1629,00	1710,37	676,82

Durch die Anreicherung der nachweislich hergestellten Schichten nach dem Prozess 2.1.2 *Vergleich Soll- zu Ist-Daten (Punktwolke zu Punktwolke)* oder 2.1.3 *Vergleich Soll- zu Ist-Daten (3D-Modell zu Punktwolke)* und deren implementierter Stationsbereiche werden die Ist-Daten[*bzw. wird die -bank*] generiert, die im vorliegenden Beispiel eine Verzögerung des Bauablaufs zeigen (Tabelle 16). Mit diesem Vorgang wird der Prozess 2.2.2 *Integration Fertigstellungsgrad* sichergestellt (Abbildung 33). Die implementierten Stationsbereiche wurden im vorliegenden Fall manuell nach Aufmaß ergänzt, da die Datengrundlage für den Prozess 2.1.2 oder 2.1.3 qualitativ nicht ausreichend war.

Tabelle 16: Ausschnitt der Ist-Daten[bank]

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	
GUIDs	Name	Station von_(Soll)	Station bis_(Soll)	Länge_(Soll) m	Flächen_(Soll) m <sup>2</sup>	Volumen_(Soll) m <sup>3</sup>	4D_Länge m	4D_Fläche m <sup>2</sup>	4D_Volumen	Stationsbereich_ausgewertet	Länge_m_ausgewertet	Fläche_m <sup>2</sup> _ausgewertet	Volumen_m <sup>3</sup> _ausgewertet	
1	{3FD872BC-8DD4-422D-8AEE-1D6793E83D32}	Frostschuttschicht BAB-km 222+143 bis 223+772	222143	223772	1629,00	32164,12	6459,98	1629,00	32164,12	6459,98	222+143 - 223+772	1629,00	32164,12	6459,98
2	{42719EC2-6B07-442C-8883-AA9E9C225718}	Schottertragschicht BAB-km 222+143 bis 223+772	222143	223772	1629,00	26458,30	5188,12	1629,00	26458,30	5188,12	222+143 - 223+772	1629,00	26458,30	5188,12
3	{A8DCB49-0EC6-4F3A-AC31-77B0851D8E75}	Tragschicht_Lage1 BAB-km 222+143 bis 223+772	222143	223772	1629,00	24852,93	2221,83	1629,00	24852,93	2221,83	222+143 - 223+125; 223+525 - 223+772	1229,00	19014,34	1697,16
4	{629A53A3-B5D6-4A8C-92CF-11CFF17B486A}	Tragschicht_Lage2 BAB-km 222+143 bis 223+772	222143	223772	1629,00	24852,93	2221,81	1629,00	24852,93	2221,81	222+143 - 223+125; 223+525 - 223+772	1229,00	19014,34	1697,15
5	{1F9C1048-8095-40B1-9243-4943284E2F27}	Binderschicht BAB-km 222+143 bis 223+772	222143	223772	1629,00	24734,30	1965,93	1629,00	24734,30	1965,93	222+143 - 223+125	982,00	14809,08	1177,35
6	{F0364A37-0896-4846-BA90-85DCD6C2E1D2}	Bankett_Außen BAB-km 222+143 bis 223+772	222143	223772	1629,00	3502,64	1148,22	1629,00	3502,64	1148,22	222+200 - 223+078,750; 223+525 - 223+772	1125,75	2689,18	815,62
7	{EEAB9D2A-6E65-462B-A812-352CF2C1E2A8}	Bankett_Innen BAB-km 222+143 bis 223+772	222143	223772	1629,00	1522,93	355,04	1629,00	1522,93	355,04	-	-	-	-
8	{BCDA80E7-BD8D-4CE4-A133-95CF2E855F83}	Füllboden BAB-km 222+143 bis 223+772	222143	223772	1629,00	2666,55	357,62	1629,00	2666,55	357,62	222+143 - 223+125; 223+525 - 223+772	1229,00	2011,73	272,05
9	{FCAB9D1A-63A1-4DA0-B2CF-61C5995E8391}	Oberbodenauftrag Randbereich BAB-km 222+143 bis 223+772	222143	223772	1629,00	18117,97	1686,56	1629,00	18117,97	1686,56	222+143 - 223+772	1629,00	18117,97	1686,56
10	{B9C860B1-7E5A-443B-B5E0-DAD4638919EA}	Oberbodenauftrag Mittelstreifen BAB-km 222+143 bis 223+772	222143	223772	1629,00	1710,37	676,82	1629,00	1710,37	676,82	-	-	-	-

Anhand der grau hinterlegten Bereiche ist erkennbar, dass die erforderlichen Soll-Werte (Spalte H bis J) nicht den ausgewerteten Werten (Spalte L bis N) entsprechen und die erforderliche Leistung nicht erbracht werden konnte. Durch GUID sind persistente Links eingerichtet, welche ohne Eingriff in die zugrunde liegende Datenstruktur von Arbeitskalkulation, Bauzeitenplan und 3D-Modell (BIM-Modell) einen Datenaustausch und Informationsauswertungen ermöglichen.

Dies ist die prozessorientierte und domänenübergreifende Auswertung von Modellinformationen. Mittels dieser Integration ist ein hohes Maß an Dateninteroperabilität gegeben. Diverse Datensätze und relevante Objekte können flexibel kombiniert werden, um den Prozess der Bauleistungsfeststellung zu beschreiben.

Stationierungen der hergestellten Bereiche sind integriert. Durch die persistente Verlinkung zu den gegebenen Soll-Daten ist hier eine direkte Visualisierung des tatsächlich hergestellten Ists gegeben (Abbildung 59).

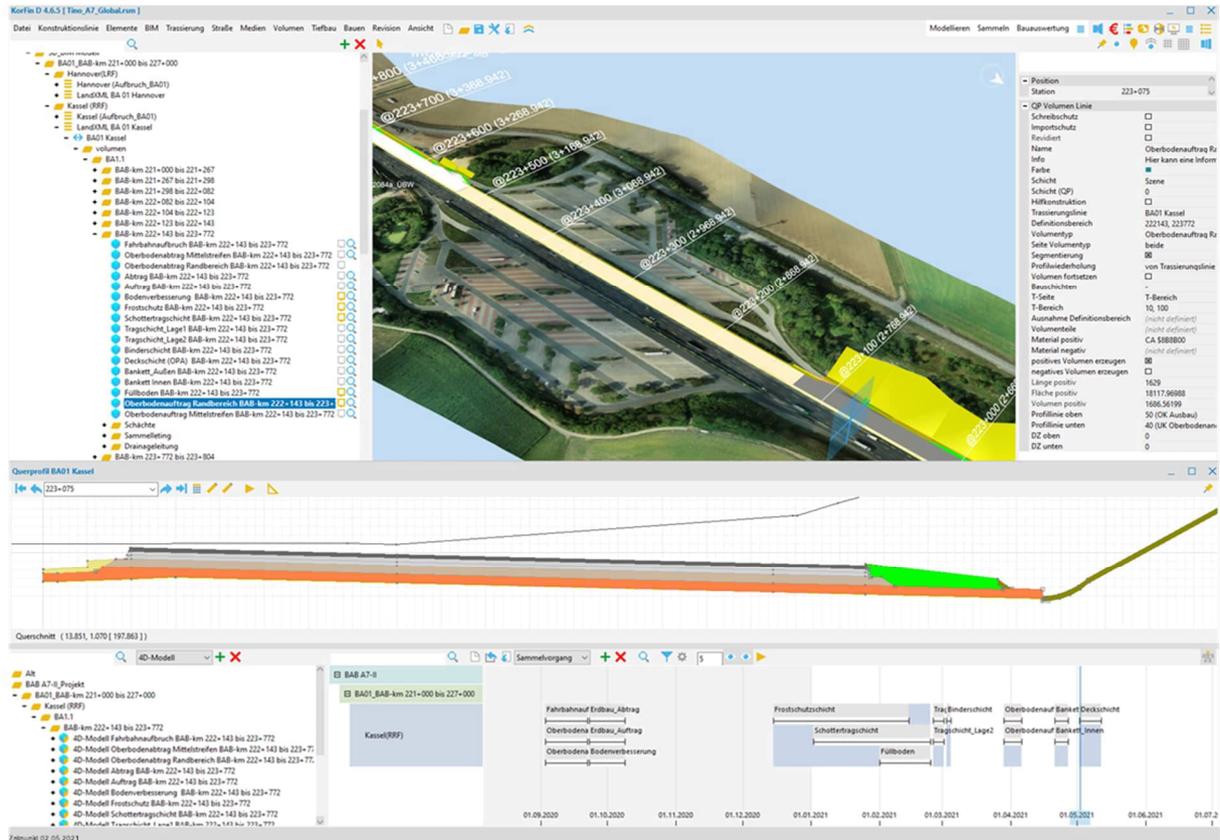
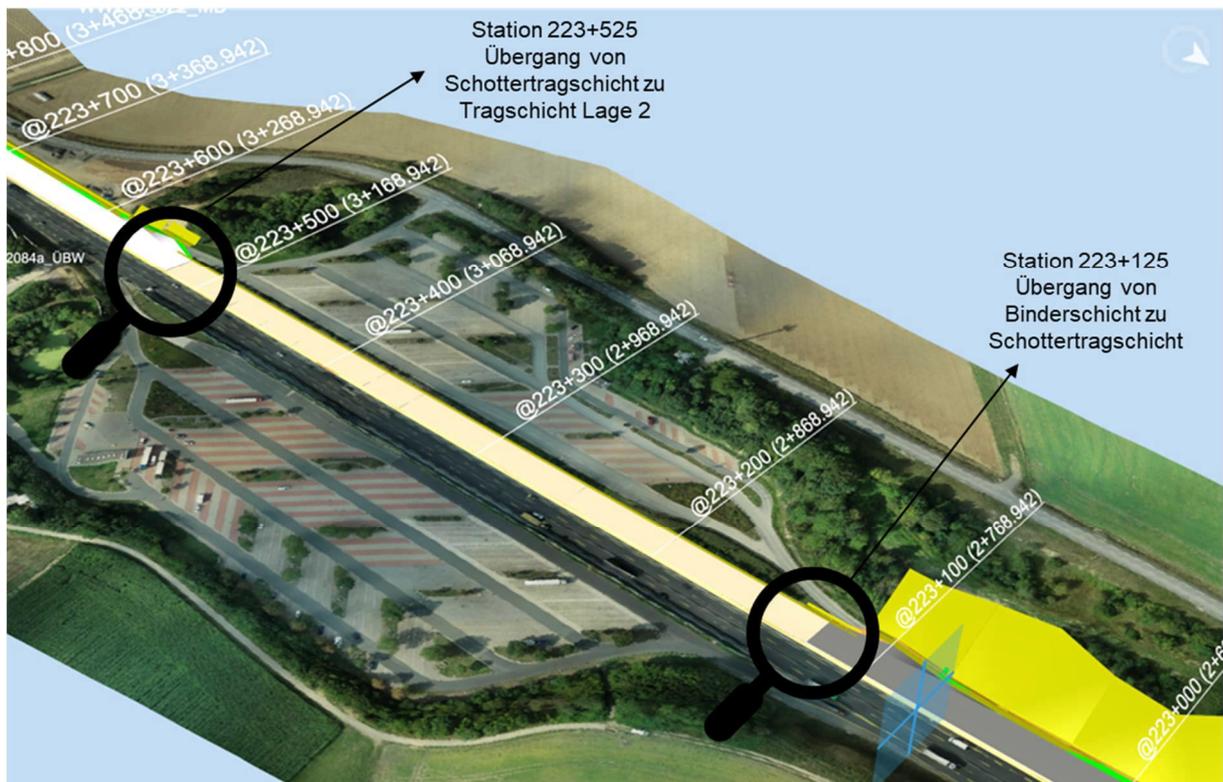


Abbildung 59: Visualisierung des ausgewerteten Fertigstellungsgrads

Abbildung 59 zeigt für den 02.05.2021 den an diesem Tag erreichten Herstellungsgrad/Arbeitsfortschritt. Die Visualisierung (Abbildung 59) und die Tabelle 16 greifen auf die gleiche Datenbank zurück und stellen prinzipiell den gleichen Sachzustand dar. Diese Visualisierung kann stufenlos für jeden Streckenbereich ausgewählt werden und zeigt das tatsächlich hergestellte Ist.

Es ist zu erkennen, dass in dem Bereich von 223+125 bis 223+525 nur die Frostschutz- und Schottertragschicht fertiggestellt ist (Abbildung 60). Nach Bauablauf hätten alle Schichten bis zur Station 223+772 hergestellt sein sollen (Tabelle 15). Der Bereich 223+125 bis 223+525 wurde aufgrund der örtlichen Gegebenheiten für ein weiteres Lager genutzt, weshalb die Herstellung der Fahrbahn unterbrochen wurde und zu einem späteren Zeitpunkt erfolgt. Dies ist ebenso Tabelle 16 entnehmbar. Diese zeigt beispielsweise in der Zelle K3 eine hergestellte Schicht von Station 222+143 bis 223+125 und von 223+525 bis 223+772. Hieraus ist erkennbar, dass die Tragschicht zwischen den Stationen 223+125 bis 223+525 noch nicht hergestellt ist.



**Abbildung 60: Darstellung fertiggestellter Schichtbereiche**

Die Ableitung der erforderlichen Daten erfolgt aus den/der Ist-Daten[bank]. Die stufenlose Integration der Schichten nach Stationierung (Abschnitt 1.2) und deren Visualisierung wurde durch einen Dienstleister programmiert. Die Firma A+S Consult hat dies, nach vorgegebenen Kriterien, Konzept und Prozess in der Software KorFin integriert.

Das Programm kann nun die Schicht/das Bauteil für einen angegebenen Stationsbereich visualisieren sowie erforderliche Informationen (bspw. LE-Menge) für diesen Bereich aus dem 3D-Modell ableiten und wiederum den/der Ist-Daten[bank] zuzuweisen. Auf diese Weise wird nicht nur der Ist-Fertigstellungsgrad visualisiert, sondern es werden anhand des zugrunde liegenden 3D-Modells (Soll-Daten[bank]) und dessen spezifischem Schichtenaufbau im Stationierungsbereich auch eingebaute Massen und Mengen ausgegeben (Tabelle 16).

Anhand der ausgewerteten LE-Mengen (Ist-Daten[bank]) lässt sich der Prozess 2.2.3 *Ermittlung tatsächlicher Leistung* umsetzen und im Zuge eines 5D-Modells (Abschnitt 2.2.7) visualisieren.

Nun kann man direkt modellbasiert zwischen den Soll- und Ist-Werten vergleichen, da sie integral mit Zeit- und Zahlenwerten verknüpft sind. Das ist ein weiterer Vorteil gegenüber der herkömmlichen Leistungsmeldung. Aufbauend auf der modellbasierten Wertesammlung können mit weiterführender Unternehmenssoftware die modellbasierten Werte je nach Unternehmensanforderung visualisiert werden.

Diesbezüglich gibt es eine Vielzahl an Dashboardsystemen, welche die ermittelten Werte in diverse Diagrammarten, je nach Unternehmensanforderung, darstellen können – siehe Prozess 3.1.3 *Modellbasierte Soll-Ist-Analyse* (Abschnitt 5.5.3).

## 7 Zielabgleich zum Modellansatz

### 7.1 Vorgehen

In diesem Kapitel erfolgt die Evaluierung anhand des entwickelten Lösungskonzeptes. Anhand der erhobenen Anforderungen wird der Erfüllungsgrad des Lösungskonzeptes nachvollziehbar bewertet, um auf diese Weise den erarbeiteten Stand sowie weiteres Optimierungspotenzial aufzuzeigen.

Die 54 nach Themenbereichen gegliederten und priorisierten Anforderungen (Kapitel 4) wurden mit dem Lösungskonzept (Kapitel 5) und dessen Validierung (Kapitel 6) verglichen. Die Bewertung erfolgte nach den drei Erfüllungsgraden (Tabelle 17) unter Berücksichtigung der in Kapitel 4 vorgenommenen Priorisierungen. Als Viertes wird eine Gruppierung eingeführt, welche nicht bewertet wird. Hierbei handelt es sich um Anforderungen (bspw. reine Softwareanforderungen), die zwar erfasst werden, bei der Entwicklung des Lösungskonzeptes aber keine Berücksichtigung finden.

**Tabelle 17: Erfüllungsgrad der Anforderungen**

Erfüllungsgrad		Beschreibung
1	vollständig umgesetzt	Die Anforderung ist vollständig im Lösungskonzept berücksichtigt und umgesetzt.
2	teilweise umgesetzt	Die Umsetzung erfolgte bspw. nur auf einen Teil der Anforderung, oder durch indirekte Umsetzung der durch die Anforderung beschriebenen Funktion/Eigenschaft.
3	nicht umgesetzt	Die Anforderung ist im Lösungskonzept nicht berücksichtigt und nicht umgesetzt.
X	keine konzeptionelle Anforderung	Es erfolgt keine Bewertung, da es sich um keine konzeptionelle Anforderung handelt.

### 7.2 Qualitative Bedarfserfüllung

Eine ausführliche Übersicht der Anforderungen sowie des Erfüllungsgrades ist Anlage 13 (Evaluierung Bedarfserfüllung) zu entnehmen.

Tabelle 18 zeigt einen Ausschnitt der in Anlage 13 durchgeführten Bewertung der Bedarfserfüllung. Im Hinblick auf eine bessere Lesbarkeit erfolgt an dieser Stelle nur eine kurze Zusammenfassung der identifizierten vier Hauptkategorien.

Tabelle 18: Exemplarischer Ausschnitt zur qualitativen Bedarfserfüllung

Kategorisierung Anforderungen				Beschreibung Anforderung		Priorität	Erfüllung der Anforderungen durch das Lösungskonzept		
lfd. Nr.	Anforderungsart	Kategorie	ID	Kurzbeschreibung	Langbeschreibung	A=Muss B=Solte C=Optional	Erfüllungsgrad	Kommentar	
1	Methodische und qualitätsbezogene Anforderungen	1	Leistungserfassung	1.1.01	• Kürzere Perioden der Leistungserfassung sind notwendig (1 x pro Monat ist nicht ausreichend)	Für effektive Gegensteuerungsmaßnahmen sind kürzere Perioden der Leistungserfassung erforderlich.	A	vollständig umgesetzt	Perioden sind im entwickelten Ansatz frei wählbar, bis hin zur täglichen Erfassung. Siehe Kapitel 5.5 und Abbildung 34.
2	Methodische und qualitätsbezogene Anforderungen	1	Leistungserfassung	1.1.02	• Erfassung des Fertigstellungsgrads bedarf einer visuellen Bestätigung/Nachvollziehbarkeit der tatsächlich aufgenommenen Daten	Die vom System erfassten Werte sollen nachvollziehbar sein und durch eine visuelle Kontrolle geprüft werden können.	A	vollständig umgesetzt	Es erfolgt eine vollständige Visualisierung und Abbildung des tatsächlich hergestellten Objektes im entwickelten Ansatz. Siehe Kapitel 5.5.2 und 6.2.
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
6	Methodische und qualitätsbezogene Anforderungen	2	Leistungsmeldung	1.2.01	• Leistungsmeldung hat direkt, ohne Zeitverlust, aufbauend zur Leistungserfassung zu erfolgen	Die Leistungsmeldung soll ohne zeitlichen Verlust im Nachgang der Leistungserfassung erfolgen. Eine spätere Auswertung führt zu verfälschten Aussagen. Eine Abbildung in Echtzeit wird angestrebt.	A	vollständig umgesetzt	Der entwickelte Prozess beinhaltet die direkte Weiterverarbeitung der automatisierten Bewertung des Fertigstellungsgrades und gewährleistet somit die direkte Leistungsmeldung (Bauleistungsfeststellung). Siehe Kapitel 5.5.2 und 5.5.3.
7	Methodische und qualitätsbezogene Anforderungen	2	Leistungsmeldung	1.2.02	• die Auswertung sollte objektiv und unabhängig vom Personal sein - es darf kein Wissen verloren gehen	Die Auswertung soll auf objektiven Fakten beruhen und nicht durch menschliche Einschätzungen und Entscheidungen beeinflusst werden.	A	vollständig umgesetzt	Durch die automatisierte Auswertung der Aufnahmen des UAV-Systems ist eine objektive Auswertung integriert worden. Siehe Kapitel 5.5.2, 6.2.1 und 6.2.2.
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

### 7.2.1 Erfüllung der methodischen und qualitätsbezogenen Anforderungen

Es wurden 17 methodische und qualitätsbezogene Anforderungen erfasst. Die als A priorisierten Anforderungen wurden vollständig umgesetzt und entsprechend bewertet. Die mit B-Priorität bewertete Anforderung (1.1.03) der Leistungserfassung (Tabelle 5, S. 87) unterliegt der Interoperabilität, welche im vorliegenden Gesamtsystem teilweise umgesetzt wurde und somit zur geforderten Fehlerminimierung und zeitlichen Optimierung beiträgt. Die mit B priorisierten Anforderungen der Leistungsmeldung (Tabelle 6, S. 88) stehen im Kontext der erforderlichen Soll-Ist-Vergleiche und deren Bewertung der Baumaßnahme zu Bauende. Diese konnten unter Berücksichtigung des entwickelten Ansatzes und Gesamtsystems in leicht abgewandelter Form umgesetzt werden. Die auf C priorisierte Anforderung (1.2.08) der Leistungsmeldung konnte nicht umgesetzt werden. Sie betrifft weitere umfangreiche Analysen und Untersuchungen zur subjektiven Bewertung einer abzugrenzenden Leistung, welche zum einen im Zielkonflikt einer objektiven Leistungserfassung steht und des Weiteren nicht in den Rahmen des Untersuchungsgegenstandes des Fertigstellungsgrades fällt.

### 7.2.2 Erfüllung der Anforderungen an den Prozess

Es sind 20 Anforderungen an den Prozess gestellt worden. Mit einer Ausnahme wurden alle als A priorisierten Anforderungen vollständig in das entwickelte Modell übernommen und dort umgesetzt. Die Anforderung 2.2.02 beinhaltet die Einbindung der Leistung von Nachunternehmern, was grundsätzlich gewährleistet werden kann, wenn der Nachunternehmer die entsprechenden Daten liefert oder diese direkt vom Hauptauftragnehmer miterfasst und ausgewertet werden.

Von den acht als B priorisierten Anforderungen wurden nochmals vier vollständig berücksichtigt und umgesetzt. Vier der als B priorisierten Anforderungen wurden teilweise berücksichtigt und umgesetzt. Diese Anforderungen beinhalten vorwiegend IT-technische Anforderungen bspw. durchgängige Schnittstellen oder eine stets performante Analyse und Auswertung. Dies kann unter Sicherstellung des richtigen Arbeitsinstrumentes und organisatorischer Einordnung gewährleistet werden, ist jedoch abhängig vom Unternehmen und dessen Auswahl.

Von den Anforderungen der Priorität C wurden 2.1.07 und 2.1.012 teilweise umgesetzt. Die Anforderung aus 2.1.07, dass der Prozess ohne Stichtagsbezug umgesetzt werden können muss, ist erfüllt. Bedacht werden sollten jedoch nötige Einflüsse, wie zugrunde liegende aktuelle Arbeitskalkulationen und aktueller Bauablaufplan, welche durch die zugehörigen Organisationen des Handlungsträgersystems bewältigt werden müssen. Daher empfiehlt sich für die Umsetzung ein fester Tagesbezug. Weil subjektive Einschätzungen zum Fertigstellungsgrad im entwickelten Prozess obsolet sind, kann von einer Minderung des Konfliktpotenzials ausgegangen werden, wie unter 2.1.012 gefordert. Abhängig ist dies jedoch von den beteiligten Organisationen des Handlungsträgersystems. Die mit C priorisierte Anforderung 2.1.04 verlangt die Bereitstellung von Soll-Daten durch den AG. Die Kopplung ist sinnvoll, bedarf jedoch einer weitreichenden systemübergreifenden Analyse, die in diesem Zusammenhang nicht umgesetzt werden kann und somit zurückgestellt wurde. Ebenso wurde die Anforderung 2.1.08 zurückgestellt. Diese verlangt, die gewonnenen Erkenntnisse für Folgeprojekte zu integrieren. Die Integration eines Wissensmanagements liegt außerhalb des Untersuchungsgegenstandes und wurde daher zurückgestellt. Auch dies ist eine gewinnbringende Ergänzung des Modells und sollte weiter untersucht werden.

### **7.2.3 Erfüllung der funktionalen Anforderungen**

Es wurden elf funktionale Anforderungen erfasst. Von den sechs Anforderungen der Priorität A wurden fünf vollständig berücksichtigt und umgesetzt. Einzig die Anforderung 3.2.05 konnte nur teilweise umgesetzt werden. Eine zeiteffizientere Aufbereitung der Daten und Aktualisierung des Modells wird in dem entwickelten Prozess angestrebt, ist jedoch wiederum von den eingesetzten Arbeitsmitteln und deren organisatorischer Gestaltung des Handlungsträgersystems abhängig. Die zwei mit B priorisierten Anforderungen wurden teilweise und vollständig umgesetzt. Die Anforderung 3.2.01 wurde vollständig umgesetzt, indem die aufgenommenen und ausgewerteten Daten durch einen persistenten Link mit dem BIM-Modell verbunden und zugewiesen werden. Eine schnelle Übermittlung der Daten bestenfalls in Echtzeit (3.2.07) wurde teilweise umgesetzt. Zum einen ist eine schnelle Übermittlung der Daten abermals abhängig vom eingesetzten Arbeitsinstrument und des Weiteren stellt sich die Frage der Bedeutung und Anwendung des Begriffes *Echtzeit*. Der Rechenvorgang und die Auswertung des Algorithmus könnten zum Feierabend gestartet werden und aktuelle Daten könnten am nächsten Morgen zu Arbeitsbeginn vorliegen. *Echtzeit* im Sinne „von einer Sekunde auf die andere“ kann mittels des entwickelten Prozesses nicht gewährleistet werden, da die Menge an Daten und der Rechenvorgang zu groß sind, um dies in kurzer Zeit umzusetzen. Die drei als C-Priorität bewerteten Anforderungen wurden bis auf eine Anforderung teilweise im Prozess integriert und umgesetzt. Die Anforderung 3.2.02 stellt keine konzeptionelle Anforderung dar und wird daher nicht berücksichtigt.

### 7.2.4 Erfüllung der nichtfunktionalen Anforderungen

Die sechs erfassten nichtfunktionalen Anforderungen beinhalten vorwiegend qualitative Anforderungen im Hinblick auf eine praktikable Anwendung des Systems und des Lösungskonzeptes. Daraus ergibt sich für alle Anforderungen die Priorität A. Technische Umsetzungen zur intuitiven Bedienung und Benutzerfreundlichkeit stellen keine konzeptionelle Anforderung dar und werden daher nicht bewertet (4.1.01 und 4.1.02). In der soft- und hardwaretechnischen Umsetzung müssen diese Anforderungen Beachtung finden; sie sind aber nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchung. Alle weiteren nichtfunktionalen Anforderungen wurden vollständig berücksichtigt und umgesetzt.

### 7.3 Quantitative Bedarfserfüllung

Tabelle 19 fasst die Bewertungen aus Abschnitt 7.2 zusammen.

**Tabelle 19: Darstellung der quantitativen Bedarfserfüllung**

Kategorie	(1) Methodische und qualitäts- bezogene Anforderungen	(2) Anforderungen an den Prozess	(3) Funktionale Anforderungen	(4) Nicht- funktionale Anforderungen	Gesamt
<b>Anzahl Anforderungen</b>	<b>17</b>	<b>20</b>	<b>11</b>	<b>6</b>	<b>54</b>
vollständig umgesetzt	14	11	6	4	35
teilweise umgesetzt	2	7	4	0	13
nicht umgesetzt	1	2	0	0	3
keine konzeptionelle Anforderung	0	0	1	2	3
<b>davon vollständig oder teilweise berücksichtigt</b>	<b>94%</b>	<b>90%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>94%</b>

Ohne die nicht konzeptionellen Anforderungen sind 94 % der Anforderungen teilweise bis vollständig im Lösungskonzept umgesetzt. Die Kategorie *Methodische und qualitätsbezogene Anforderungen* weist einen ebenso hohen Anteil an teilweise bzw. vollständig umgesetzten Anforderungen auf. Ganz bewusst, wurde hier also die Methode der Bauleistungsfeststellung in einen qualitativ verbesserten Prozess überführt. Die quantitative Umsetzung der Anforderungen an den Prozess fällt unbeträchtlich geringer aus. Mit 90 % konnten nur zwei Anforderungen nicht berücksichtigt werden. Dies zeigt die Wichtigkeit eines anwendbaren Prozesses, um als Standard Akzeptanz zu erlangen. Die Kategorien *funktionale Anforderungen* und *nichtfunktionale Anforderungen* wurden zu 100 % teilweise bis vollständig im Lösungskonzept berücksichtigt. Dies verdeutlicht die hohe Priorität der Datenqualität und Datenverarbeitung. Die Handhabbarkeit im Kontext des Gesamtsystems ist von großer Bedeutung.

Für eine maßstabgerechte Bewertung des Lösungskonzeptes sollte zudem das Verhältnis von „Muss- und Sollte“-Anforderungen (Priorität A und B) zum Erfüllungsgrad der Anforderungen aufgezeigt werden (Abbildung 61).

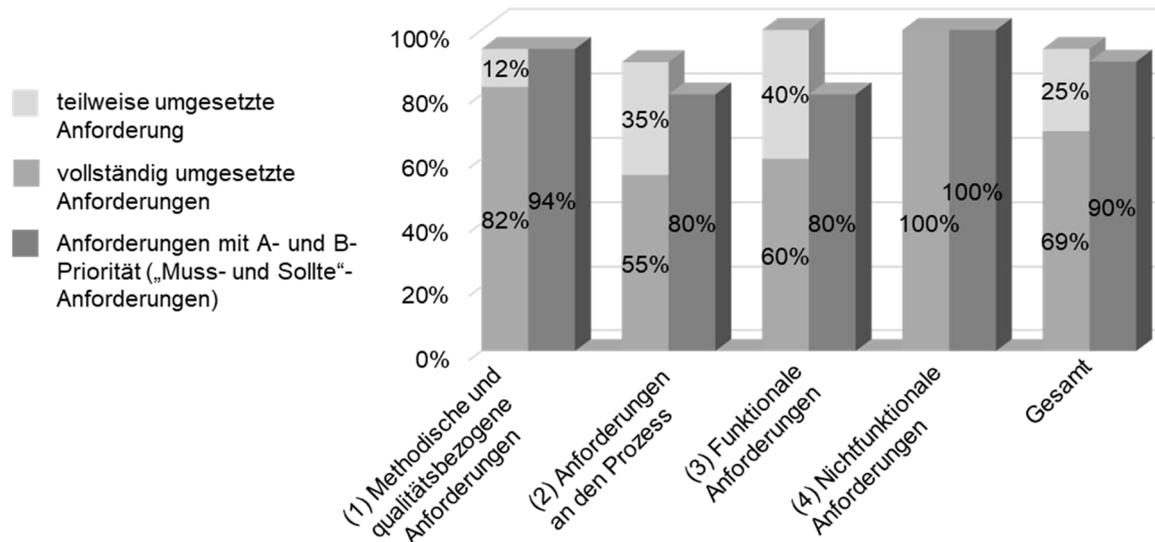


Abbildung 61: Verhältnis von Priorisierung und Erfüllungsgrad der Anforderungen

Es wurden alle methodischen und qualitätsbezogenen Anforderungen der Priorität A und B im Lösungskonzept berücksichtigt. Dies spiegelt den hohen Stellenwert der zugrunde liegenden Methode der Bauleistungsfeststellung wider. 90 % der Anforderungen an den Prozess der Bauleistungsfeststellung konnten vollständig oder teilweise umgesetzt werden. 35 % hiervon wurden mit Abweichungen berücksichtigt. Funktionale Anforderungen konnten alle teilweise und vollständig berücksichtigt werden (40 % + 60 %). Auch der Anteil der mit C priorisierten Anforderungen ist bereits im Lösungskonzept berücksichtigt. Für eine hohe Akzeptanz aller Anwender sind vor allem die nichtfunktionalen Anforderungen von großer Bedeutung, deshalb wurden dies überproportional und zu 100 % in das Lösungskonzept integriert.

Kumuliert über alle Anforderungen wurden 90 % mit A und B priorisiert. Vollständig und teilweise umgesetzt wurden hierbei 94 % (69 % + 25 %). Dies zeigt, dass ein sehr hoher Erfüllungsgrad (gemessen an der Priorisierung der Anforderung) mit dem entwickelten Lösungskonzept erreicht werden konnte. 10 % des Gesamtanteils der Anforderungen mit der Priorisierung C führen auf Zielkonflikte innerhalb der Anforderungen zurück sowie auf Zurückstellung der Anforderungen für weiterführende Optimierungen (Kapitel 4).

## 7.4 Abschließender Blick auf die Bedarfserfüllung

Ausgehend von den priorisierten Anforderungen zeigt die Evaluierung des Lösungskonzeptes, dass ein Großteil der erhobenen Anforderungen berücksichtigt und integriert wurde. Infolge festzustellender Zielkonflikte war es gleichermaßen erforderlich, einzelne Anforderungen zurückzustellen. Die qualitative Auswertung der Bedarfserfüllung spiegelt die in Kapitel 4 erstellte Priorisierung wider. Gleichermäßen zeigt die quantitative Bedarfserfüllung, dass für das vorliegende entwickelte Lösungskonzept und Gesamtsystem ein hoher Anteil (der kleinste Wert beträgt 80 %, Abbildung 61) von A- und B-Prioritäten aus den erhobenen Anforderungen hervorgehen und diese immer vollständig oder teilweise Beachtung finden. Vereinzelt wurden ebenso C-Prioritäten miterfasst.

## 8 Schlussbetrachtung

### 8.1 Wissenschaftlicher Beitrag

Ziel der Arbeit war es die Baufortschrittserkennung weiterzuentwickeln, einen Beitrag zu einem praxisorientierten Ansatz hinsichtlich der automatisierten Erfassung und Verarbeitung des resultierenden Ergebnisses für Linienbaustellen zu leisten. Das zeigen nun die exemplarische Entwicklung des Modells und seine prototypische Umsetzung.

Als Grundlage für die zielgerichtete Entwicklung wurde zum einen eine umfangreiche internationale Literaturrecherche und zum zweiten eine nationale fallstudienorientierte Datenerhebung bei ausgewählten Unternehmen der Zielgruppe durchgeführt. Des Weiteren flossen umfangreiche eigene Erfahrungen als Projekt- und Bauleiter sowie spezifische eigene Beobachtungen ein. Als Ergebnis der Untersuchung steht die Beschreibung eines detaillierten Verständnisses für die Rahmenbedingungen und Anforderungen in dem gewählten Untersuchungskontext. Darauf aufbauend wurden die gewonnenen Erkenntnisse thematisch strukturiert und priorisiert. So entsteht die Zusammenfassung der Ergebnisse in einer Anforderungsdatenbank.

Basierend auf diesen Anforderungskatalog Bedarfsermittlung wurde ein integrales Lösungskonzept zur Bauleistungsfeststellung und Verarbeitung erarbeitet. Dieses Modell ist in vier Subsysteme – das Ziel-, das Produkt-, das Handlungsträger- und das Handlungssystem – gegliedert. Hauptaugenmerk liegt hierbei auf dem Handlungssystem, welches die entwickelten Prozesse, deren zugehörige Algorithmen zur Auswertung der Punktwolken und deren Einbindung und Interoperabilität in ein Bauwerksmodell hinreichend erläutert und wiedergibt. Anhand der recherchierten Schwachstellen in dem bisherigen Vorgehen wurde das Modell zur Optimierung der Bauleistungsfeststellung entwickelt. Es strukturiert und standardisiert den Prozess der Leistungserfassung und deren Auswertung zur weiteren Analyse der Bauleistungsfeststellung. Aufgrund der allgemeinen Beschreibung und Modellierung der verwendeten Algorithmen sind diese universell einsetzbar.

Anhand der Einteilung und Darstellung des Modells mithilfe von Elementen der Systemtheorie des Bauprozessmanagements wird ein formales Modell beschrieben. Mit dem Zielsystem gehen die priorisierten Anforderungen aus der empirischen Studie und Literaturrecherche einher. Das Produktsystem stellt die Basis dar und liefert alle Informationen und Daten, die für die Bauleistungsfeststellung vonnöten sind. Das Handlungsträgersystem bildet hierbei externe Faktoren ab, wie organisatorische Eingliederung sowie einsetzbare Arbeitsinstrumente, welche ebenso Einfluss auf das Modell nehmen. Prozesse und Handlungsalternativen werden durch das Handlungssystem beschrieben. Dieses stellt das grundlegende Vorgehen unter Einbindung und Berücksichtigung der Subsysteme dar. Die enthaltenen Prozesse sind nach dem allgemein anwendbaren Standard der BPMN-Notation entwickelt worden.

Die mittels des Modells beschriebenen theoretischen Prozesse wurden exemplarisch IT-gestützt umgesetzt und deren Interoperabilität wurde aufgezeigt. An einem Beispielszenario einer typischen innerstädtischen Linienbaustelle wurden die Aufbereitung und das Vorgehen zur Analyse des Fertigstellungsgrades verifiziert. Die Interoperabilität der modellbasierten Anwendbarkeit der automatisierten Bauleistungsfeststellung wurde an einem weiteren Beispiel überprüft.

## 8.2 Praktischer Beitrag

Anhand der praktischen Analyse auf Basis von Interviews bei ausgewählten Unternehmen der Zielgruppe und der daraus abgeleiteten Anforderungen sowie deren prototypischer Umsetzung wurde ein praxisgerechtes, anwendbares Modell entwickelt.

Zusammenfassend ist das Modell in der Lage, für den Schichtenaufbau einer Linienbaustelle eine objektive, semiautomatisierte Bauleistungsfeststellung anhand des automatisiert ausgewerteten Fertigstellungsgrades abzubilden.

Das entwickelte Modell zeigt ein Rahmenkonzept auf. Bei Leistungsänderungen entsteht nur ein sehr geringer Aufwand. Lediglich das jeweilige Soll des Produktmodells ist anzupassen.

Vorteil der entwickelten und aufgezeigten Methode ist der geringe Zeitaufwand der Aufnahme sowie der Analyse des Fertigstellungsgrades der einzelnen Schichten. Dies geht aus dem hohen Automatisierungsgrad hervor. Schätzwerte des Fertigstellungsgrades entfallen. Der Fertigstellungsgrad ist zu jeder Zeit objektiv und im jeweils gewählten Detaillierungsgrad auswertbar. Traditionell erfordert dies einen hohen personellen und zeitlichen Aufwand.

Eine Stärke der Auswertung ist die Visualisierung der tatsächlich hergestellten Bereiche. Dies lässt auf einen Blick den genauen Bauablauf nachvollziehen und gewährleistet eine durchgängige Transparenz, die nicht nur auf Zahlenwerten beruht, sondern direkt visuell durch jeden Projektbeteiligten überprüft werden kann.

Ein wichtiger Bestandteil ist das schnelle Erkennen und Aufzeigen des tatsächlichen Fertigstellungsgrades und der daraus resultierenden Bauleistungsfeststellung. Die objektive automatisierte Auswertung leistet einen wichtigen Beitrag für den Entscheidungsprozess bei Erkennen von Fehlentwicklungen. Dies kann zu einem wesentlich früheren Zeitpunkt erfolgen und unterstützt damit die Einhaltung des vorgegebenen Planziels. Durch die Anwendung des entwickelten Modells wird der Ingenieur durch die bisher zeitlich aufwendige Erfassung und Auswertung der Daten nun entlastet und kann seine Aufmerksamkeit dem tatsächlichen Bauprozess und der Erreichung des Planziels widmen.

Die erarbeitete und vorgestellte Methode zur Optimierung der Bauleistungsfeststellung von Linienbaustellen bedarf einer Reihe von weiteren Entwicklungsschritten, um Einzug in der baubetrieblichen Praxis zu halten. Es sollten stets aktuelle Technologien und Entwicklungen zur Erfassung von Daten angewandt werden und in die zentrale Datenbank einfließen.

Das theoretische Modell wurde anhand von Beispielszenarien ausgewählter Baustellen auf dessen Anwendbarkeit überprüft und verdeutlicht.

Das Modell ist in der Lage, alle erforderlichen praxisrelevanten Prozesse in einer Struktur abzubilden. Es bietet somit ein handlungs- und anwendungsorientiertes Modell zur Optimierung der Bauleistungsfeststellung für die Praxis.

Die Vorteile lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Erfassung und Auswertung der Daten sind objektiv und werden somit nicht durch subjektive Einschätzung verfälscht.
- Durch objektive Erfassung und Auswertung wird eine verbesserte und gleichbleibende Qualität erreicht.

- Nachvollziehbarkeit und Transparenz ist durch eine objektorientierte Visualisierung der Daten gegeben.
- Es wird eine Zeiteffizienz durch einen standardisierten, zeitlich unabhängig durchführbaren Prozess erreicht.
- Die Einbindung einer zentralen Datenbank und BIM-Integration lässt weitere objektorientierte Analysen und Auswertungen zu.
- Die realen ausgewerteten, visualisierten Werte geben die Möglichkeit einer frühzeitigen Nachsteuerung bei erkennbarer Fehlentwicklung.

Das Modell hat somit die Lücke geschlossen, die durch die konventionelle händische, intransparente und oft redundante Arbeitsweise bei der Erfassung und Auswertung der Daten für die Bauleistungsfeststellung entstanden ist. Das Modell lässt sich flexibel auf organisatorische Unternehmensstrukturen anpassen.

### 8.3 Handlungsempfehlung

Zur Unterstützung der Nutzung der Untersuchungsergebnisse in der Praxis werden folgende Empfehlungen gegeben.

- Die Aufnahme der Punktwolke sollte durch qualifiziertes Personal durchgeführt werden, um eine hohe Qualität der Aufnahme und der daraus resultierenden Ergebnisse gewährleisten zu können – redundante Arbeiten sind entsprechend obsolet.
- Größere Strecken sollten in mehrere Auswertungsabschnitte eingeteilt werden, welche sich anhand des gewählten Detaillierungsgrades und der daraus entstehenden Performance der IT-Systeme ergeben. Diese Abhängigkeiten sollten vor Beginn der Baumaßnahme geprüft und festgelegt werden.
- Beide Verfahren, *Punktwolke zu Punktwolke* sowie *Punktwolke zu 3D-Modell zu Punktwolke*, zeigen einen praxistauglichen Weg zur automatisierten Bewertung des Fertigstellungsgrades. Für eine Integration in den Unternehmensprozess sollten im Vorfeld bestehende und erforderliche neue Arbeitsinstrumente und deren Software auf Interoperabilität untersucht werden, um größere softwaretechnische Anpassungen und ggf. daraus resultierende Qualitätsverluste zu umgehen.
- Der automatisiert ausgewertete Fertigstellungsgrad sollte stichprobenartig überprüft werden. Dies kann durch eine visuelle Kontrolle vor Ort oder anhand der im Prozess entstehenden Orthophotos erfolgen.
- Der Aufbau der Soll-Daten[bank] bzw. Ist-Daten[bank] muss so gestaltet werden, dass diese jederzeit mit erforderlichen Daten erweiterbar ist (bspw. für Personal-, Material- und Gerätedaten zur Integration aller erforderlichen Daten für eine vollständige objektorientierte Bauleistungsfeststellung).
- Die Datenübergabe soll möglichst automatisiert sein und einen hohen Grad an Interoperabilität aufweisen. Dies stellt zwar hohe Anforderungen an die unternehmensinternen IT-Systeme, ist für einen durchgängigen fehlerfreien Prozess jedoch vorteilhaft.

- Die ausgewerteten Ergebnisse sollten rückführbar in eine BIM-Umgebung sein und der Fertigstellungsgrad bauteilbezogen visualisiert werden, um eine schnelle und höhere Nachvollziehbarkeit der Daten zu gewährleisten.
- Die Auswertung sollte letztlich durch eine leitende projektbeteiligte Person (bspw. Projekt-, oder Bauleiter) auf Plausibilität geprüft werden.

## 8.4 Ausblick

Die vorgestellte Herangehensweise und Methode zeigt einen Ordnungsrahmen für einen optimierten Ansatz der Bauleistungsfeststellung von Linienbaustellen auf Grundlage einer Punktwolkenaufnahme durch ein UAV-System.

Aufgrund der Komplexität des Gesamtsystems konnten nicht alle theoretisch beschriebenen Prozesse und Funktionalitäten in einem Softwareprototyp eingesetzt werden. Jedoch wurden die nicht umgesetzten Prozesse hinreichend genau zur Implementierung eines Softwareprototyps beschrieben. Entscheidend ist die Integration des Modells in die Softwareumgebung der jeweiligen Unternehmung, weshalb die Interoperabilität der Ergebnisse exemplarisch aufgezeigt wurde und von übergeordneter Bedeutung ist.

Folgend werden bisherige Grenzen des entwickelten Modells und daraus resultierender Forschungs- und Entwicklungsbedarf aufgezeigt.

Die Performance der Punktwolkenauswertung für größere Bereiche stellt immer wieder Herausforderungen dar, denn die enorme Datenmenge lässt sich schwer händeln. Ein erster Ansatz ist der Prozess des Voxel-Downsamplings, jedoch sollte dieser weiter untersucht werden, um einen täglichen performanten IT-Prozess gewährleisten zu können. Ob Verbesserungen eher in Bezug auf die Leistungsfähigkeit der Speichermedien oder tatsächlich beim Voxel-Downsampling zu erzielen sind, muss weiter betrachtet werden.

Weiter besteht Forschungsbedarf in der verbesserten Auswertung von Punktwolken aus Aufnahmen durch UAV-Systeme. Der Bereich der Bilderkennung durch künstliche Intelligenz und die Auswertung von Oberflächenstrukturen zur Darstellung des Fertigstellungsgrades kann eine neue vielversprechende Herangehensweise sein – das betrifft auch das automatische Ausschließen von Störkörpern in der Punktwolke.

Es scheint unwahrscheinlich, dass autonome Fortschrittserkennungssysteme, die in naher Zukunft entwickelt werden, immer fehlerfrei funktionieren werden. Daher bedarf es weiterer Untersuchungen und des Aufschlusses hinsichtlich Zuverlässigkeit und vor allem verbesserter Genauigkeit der Ergebnisse der Systeme bzw. eingebauter Plausibilitätsprüfungen.

Weiteres Potenzial besteht darin, die Datenbank weiter anzureichern mit dem Ziel einer vollständigen objektorientierten Bauleistungsfeststellung und Integration von Personal-, Material- und Gerätedaten und der tatsächlich anfallenden Ist-Kosten. Ebenso sollten Daten zum Fertigstellungsgrad von Bauteilen integriert werden, welche nicht nach dem vorgestellten Verfahren über Kilometrierungsstationen erfolgen können.

Die objektorientierte Auswertung an einem BIM-Modell verbessert die Transparenz und verkürzt die Bearbeitungszeit nach der Integration des Fertigstellungsgrades.

## Literaturverzeichnis

### **Abels und Behrens, M., 2005**

Abels, Gabriele; Behrens, Maria (2005): *ExpertInnen-Interviews in der Politikwissenschaft. Geschlechtertheoretische und politikfeldanalytische Reflexion einer Methode*. In: Alexander Bogner, Beate Littig und Wolfgang Menz (Hg.): *Das Experteninterview. Theorie, Methode, Anwendung*. 2. Aufl. Wiesbaden: Springer Verlag, S. 173–190.

### **Ailland, 2013**

Ailland, Karin (2013): *Ereignisbasierte Abbildung von Bau-Ist-Zuständen*. Dissertation. Bauhaus-Universität Weimar, Weimar, Professur Baubetrieb und Bauverfahren.

### **Akremiti, 2019**

Akremiti, Leila (2019): *Stichprobenziehung in der qualitativen Sozialforschung*. In: Nina Baur und Jörg Blasius (Hg.): *Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung*. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer Verlag, S. 313–331.

### **Amann und Borrmann, 2015**

Amann, Julian; Borrmann, Andre´ (2015): *Open BIM for Infrastructure – mit OKSTRA und IFC Alignment zur internationalen Standardisierung des Datenaustauschs*. In: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hg.): *Objektkatalog für das Straßen- und Verkehrswesen*. 6. OKSTRA-Symposium. Köln.

### **Arbeitskreis Digitalisiertes Bauen, 2019**

Arbeitskreis Digitalisiertes Bauen (2019): *BIM im Strassenbau. Positionspapier der Arbeitsgruppe Strassenbau im Arbeitskreis Digitalisiertes Bauen im Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V.* Berlin.

### **Artus et al., 2021**

Artus, Mathias; Koch, Christian; König, Markus (2021): *Datenmodellierung*. In: Andre´ Borrmann, Markus König, Christian Koch und Jakob Beetz (Hg.): *Building Information Modeling. Technologische Grundlagen und industrielle Praxis*. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer Verlag, S. 53–72.

### **Banse et al., 2006**

Banse, Gerhard; Grunwald, Armin; König, Wolfgang; Ropohl, Günther (2006): *ERKENNEN UND GESTALTEN. Eine Theorie der Technikwissenschaften*. Nomos Verlag.

### **Bargstädt und Steinmetzger, 2016**

Bargstädt, Hans-Joachim; Steinmetzger, Rolf (2016): *Grundlagen des Baubetriebswesens. Schriften der Professur Baubetrieb und Bauverfahren*. 5. Auflage. Kromsdorf: Bauhaus-Universitätsverlag Weimar.

**Bauch und Bargstädt, 2020**

Bauch, Ullrich; Bargstädt, Hans-Joachim (2020): *Praxis-Handbuch Bauleiter. Bauleistungen sicher überwachen*. 3. Auflage. Köln: Rudolf Müller.

**Bauer, 2018**

Bauer, Manfred (2018): *Vermessung und Ortung mit Satelliten. Globale Navigationssatellitensysteme (GNSS) und andere satellitengestützte Navigationssysteme*. 7. Auflage. Berlin/Offenbach: Wichmann.

**Bauindustrieverband NRW e.V., 2018**

Bauindustrieverband NRW e.V. (2018): *Deutsche Bauindustrie zu QR-Codes und digitalen Rechnungen*. Online verfügbar unter <https://www.bauindustrie-nrw.de/presse/pressemitteilungen/detail/2018-06-26-deutsche-bauindustrie-zu-qr-codes-und-digitalen-rechnungen/>, zuletzt geprüft am 19.02.2022.

**Beetz, 2021**

Beetz, Jakob (2021): *Ordnungssysteme im Bauwesen: Terminologien, Klassifikationen, Taxonomien und Ontologien*. In: Andre´ Borrmann, Markus König, Christian Koch und Jakob Beetz (Hg.): *Building Information Modeling. Technologische Grundlagen und industrielle Praxis*. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer Verlag, S. 209–221.

**Behnam et al., 2016**

Behnam, Ali; Wickramasinghe, Darshana Charitha; Ghaffar, Moataz Ahmed Abdel; Vu, Tuong Thuy; Tang, Yu Hoe; Isa, Hazril Bin Md (2016): *Automated progress monitoring system for linear infrastructure projects using satellite remote sensing*. In: *Automation in Construction* 68, S. 114–127.

**Berger, 2015**

Berger, Christoph (2015): *Kostenüberschreitungen bei Großprojekten*. Hg. v. Springer Verlag. Online verfügbar unter <https://www.springerprofessional.de/baubetrieb/strassenbau/kostenueberschreitungen-bei-grossprojekten/6558678>, zuletzt geprüft am 19.02.2022.

**Berner et al., 2013**

Berner, Fritz; Kochendörfer, Bernd; Schach, Rainer (2013): *Grundlagen der Baubetriebslehre 1*. Wiesbaden: Springer Verlag.

**Berner et al., 2015**

Berner, Fritz; Kochendörfer, Bernd; Schach, Rainer (2015): *Grundlagen der Baubetriebslehre 3*. Wiesbaden: Springer Verlag.

**Bethmann und Luhmann, 2017**

Bethmann, Folkmar; Luhmann, Thomas (2017): *Object-Based Semi-global Multi-image Matching*. In: *Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science - PFG* (6), S. 349–364.

**Binder, 2014**

Binder, Florian (2014): *Ereignisbasierte Steuerung bauleistungsprozesse mit Echtzeit-Ortungssystemen*.

Dissertation. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, Institut für Baubetrieb.

**Birtel, 2019**

Birtel, Thomas (2019): *Wege zur digitalen Transformation der Bauindustrie. Trend und Treiber: Disruption oder Evolution?* In: Detlef Heck (Hg.): *Bauen neu denken*. 5. Internationaler BBB-Kongress. Graz: Verlag der Technischen Universität Graz, S. 17–31.

**Bittner und Spence, 2003**

Bittner, Kurt; Spence, Ian (2003): *Use case modeling*. Boston: Addison-Wesley.

**Blankenbach, 2018**

Blankenbach, Jörg (2018): *Building Surveying for As-Built Modeling*. In: Andre´ Borrmann, Markus König, Christian Koch und Jakob Beetz (Hg.): *Building Information Modeling. Technology Foundations and Industry Practice*. Cham: Springer Verlag, S. 393–411.

**Blickle et al., 2014**

Blickle, Alexander; Feigel, Anja; Jagenow, Simon; Hauber, Thomas; Baiker-Ulmschneider, Nicole; Renz, Jochen; Stock, Stephan; Scherer, Raimar Joseph (2014): *Multimodellaufbau unter Einsatz von Bauteilbibliotheken*. In: Raimar Joseph Scherer und Sven-Eric Schapke (Hg.): *Informationssysteme im Bauwesen 1. Modelle, Methoden und Prozesse*. Berlin: Springer Verlag, S. 167–224.

**BMVI, 2017**

BMVI (2017): *Umsetzung des Stufenplans Digitales Planen und Bauen. Erster Fortschrittsbericht*. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur.

**Boehm, 1988**

Boehm, Barry (1988): *A spiral model of software development and enhancement*. In: *Computer* (21), S. 61–72.

**Bogner et al., 2014**

Bogner, Alexander; Littig, Beate; Menz, Wolfgang (2014): *Interviews mit Experten. Eine praxisorientierte Einführung*. Wiesbaden: Springer VS.

**Borrmann, 2018**

Borrmann, Andre´ (2018): *Building Information Modeling: Why? What? How?* In: Andre´ Borrmann, Markus König, Christian Koch und Jakob Beetz (Hg.): *Building Information Modeling. Technology Foundations and Industry Practice*. Cham: Springer Verlag, S. 1–24.

**Borrmann et al., 2018**

Borrmann, Andre´; Beetz, Jakob; Koch, Christian; Liebich, Thomas; Muhic, Sergej (2018): *Interoperability in AEC. Industry Foundation Classes: A Standardized Data Model for the Vendor-Neutral Exchange of Digital Building Models*. In: Andre´ Borrmann, Markus König, Christian Koch und Jakob Beetz

(Hg.): *Building Information Modeling. Technology Foundations and Industry Practice*. Cham: Springer Verlag, S. 81–126.

**Borrmann und Berkhahn, 2018**

Borrmann, Andre´; Berkhahn, Volker (2018): *Principles of Geometric Modeling*. In: Andre´ Borrmann, Markus König, Christian Koch und Jakob Beetz (Hg.): *Building Information Modeling. Technology Foundations and Industry Practice*. Cham: Springer Verlag, S. 27–41.

**Borrmann und Heunecke, 2019**

Borrmann, Andre´; Heunecke, Otto (2019): *BIM für den Infrastrukturbau*. In: Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement - DVW e.V. (Hg.): *Leitfaden Geodäsie und BIM*, S. 33–48.

**Chen, S. et al., 2019**

Chen, Siyua; Laefer, Debra F.; Mangina, Eleni; Zolanvari, S. M. Iman; Byrne, Jonathan (2019): *UAV Bridge Inspection through Evaluated 3D Reconstructions*. In: *Journal of Bridge Engineering* 24 (4), S. 1–15.

**Chou et al., 2010**

Chou, Jui-Sheng; Chen, Hung-Ming; Hou, Chuan-Chien; Lin, Chun-Wei (2010): *Visualized EVM system for assessing project performance*. In: *Automation in Construction* 19 (5), S. 596–607.

**DAkKS, 2010**

DAkKS (2010): *Leitfaden Usability. Gestaltungsrahmen für den Usability-Engineering-Prozess - Prüfverfahren für die Konformitätsprüfung interaktiver Systeme auf Grundlage von DIN EN ISO 9241*. Auflage 1.3. Hg. v. Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH. Berlin/ Frankfurt a. Main.

**Dangelmaier, 1999**

Dangelmaier, Wilhelm (1999): *Fertigungsplanung. Planung von Aufbau und Ablauf der Fertigung Grundlagen, Algorithmen und Beispiele*. Berlin/Heidelberg: Springer Verlag.

**Debus und Mellenthin Filardo, 2021**

Debus, Paul; Mellenthin Filardo, Martina (2021): *Drohnen im Bauwesen. Wissen zu Einsatz, Technik und BIM*. 1. Auflage. Berlin: bSD Verlag.

**DelPico, 2013**

DelPico, Wayne J. (2013): *Project Control: Integrating Cost and Schedule in Construction*. John Wiley & Sons.

**Demharter et al., 2014a**

Demharter, Jürgen; Fuchs, Sebastian; Schapke, Sven-Eric; Scherer, Raimar Joseph (2014): *Multimodell und Multimodellcontainer*. In: Raimar Joseph Scherer und Sven-Eric Schapke (Hg.): *Informationssysteme im Bauwesen 1. Modelle, Methoden und Prozesse*. Berlin: Springer Verlag, S. 39–63.

**Demharter et al., 2014b**

Demharter, Jürgen; Muntziger, Hans-Dieter; Scherer, Raimar Joseph (2014):

*Multimodellbasierte Ausschreibung und Vergabe von Bauleistungen.* In: Raimar Joseph Scherer und Sven-Eric Schapke (Hg.): Informationssysteme im Bauwesen 2. Anwendungen. Berlin: Springer Verlag, S. 195–212.

**Deutsche Telekom AG/techconsult GmbH, 2021**

Deutsche Telekom AG/techconsult GmbH (2021): *Der digitale Status Quo im deutschen Baugewerbe. Digitalisierungsindex 2020/2021.* Hg. v. Deutsche Telekom AG/techconsult GmbH.

**DIN 69901-5, 2009**

DIN 69901-5 (2009): *Projektmanagement - Projektmanagementsysteme - Teil 5. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.* Berlin: Beuth Verlag GmbH.

**DIN EN ISO 9241-210:2020-03, 2020**

DIN EN ISO 9241-210:2020-03 (2020): *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 210: Menschzentrierte Gestaltung interaktiver Systeme. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.* Berlin: Beuth Verlag GmbH.

**DIN SPEC 91350:2016-11, 2016**

DIN SPEC 91350:2016-11 (2016): *Verlinkter BIM-Datenaustausch von Bauwerksmodellen und Leistungsverzeichnissen. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.* Berlin: Beuth Verlag GmbH.

**DIN SPEC 91400:2015-01, 2015**

DIN SPEC 91400:2015-01 (2015): *Building Information Modeling (BIM) – Klassifikation nach STLB-Bau. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.* Berlin: Beuth Verlag GmbH.

**Durchführungsverordnung (EU) 2019/947, 2019**

Durchführungsverordnung (EU) 2019/947 (2019): *Vorschriften und Verfahren für den Betrieb unbemannter Luftfahrzeuge: Amtsblatt der Europäischen Union.*

**Egger et al., 2013**

Egger, Martin; Hausknecht, Kerstin; Liebich, Thomas; Przybylo, Jakob (2013): *BIM-Leitfaden für Deutschland. ZukunftBAU, ein Forschungsprogramm des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS).* Hg. v. Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumentwicklung (BBR).

**Ellinger und Walther, 2021**

Ellinger, Andreas; Walther, Tino (2021): *Combining point-cloud-to-model-comparison with image recognition to automate progress monitoring in road construction.* Unter Mitarbeit von Parimal Vala und Christian Wörner. In: Vitaly Semenov und Raimar Joseph Scherer (Hg.): ECPPM 2021. 13th European Conference on Product & Process Modelling. Moskau: CRC Press/Balkema.

**Fauth, 2021**

Fauth, Judith (2021): *Zur Feststellung der Baugenehmigungsfähigkeit von Bauvorhaben unter Betrachtung von Building Information Modeling.*

Dissertation. Bauhaus-Universität Weimar, Weimar, Professur Baubetrieb und Bauverfahren.

**Fiedler, 2016**

Fiedler, Rudolf (2016): *Controlling von Projekten*. Wiesbaden: Springer Verlag.

**Finkenzeller und Gebhart, 2015**

Finkenzeller, Klaus; Gebhart, Michael (2015): *RFID-Handbuch. Grundlagen und praktische Anwendungen von Transpondern, kontaktlosen Chipkarten und NFC*. 7. Auflage. München: Hanser.

**Gadatsch, 2017**

Gadatsch, Andreas (2017): *Grundkurs Geschäftsprozess-Management. Analyse, Modellierung, Optimierung und Controlling von Prozessen*. 8. Auflage. Wiesbaden: Springer Verlag.

**Girmscheid, 2007**

Girmscheid, Gerhard (2007): *Forschungsmethodik in den Baubetriebswissenschaften*. 2. Auflage. Zürich: Eigenverlag des Instituts für Bauplanung und Baubetrieb an der ETH Zürich.

**Girmscheid, 2014**

Girmscheid, Gerhard (2014): *Bauunternehmensmanagement-prozessorientiert Band 2. Operative Leistungserstellungs- und Supportprozesse*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.

**Girmscheid und Motzko, 2013**

Girmscheid, Gerhard; Motzko, Christoph (2013): *Kalkulation, Preisbildung und Controlling in der Bauwirtschaft. Produktionsprozessorientierte Kostenberechnung und Kostensteuerung*. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.

**Gläser und Laudel, 2010**

Gläser, Jochen; Laudel, Grit (2010): *Experteninterviews und qualitative Inhaltsanalyse als Instrumente rekonstruierender Untersuchungen*. 4. Auflage. Wiesbaden: Verlag für Sozialwissenschaften.

**Goldratt und Cox, 2013**

Goldratt, Eliyahu M.; Cox, Jeff (2013): *Das Ziel. Ein Roman über Prozessoptimierung*. Frankfurt: Campus Verlag GmbH.

**Greiner und Scherer, 2014**

Greiner, Peter; Scherer, Raimar Joseph (2014): *Multimodelle im Bauprojektmanagement und Risikomanagement*. In: Raimar Joseph Scherer und Sven-Eric Schapke (Hg.): *Informationssysteme im Bauwesen 2. Anwendungen*. Berlin: Springer Verlag, S. 151–165.

**Günthner und Borrmann, 2011**

Günthner, Willibald A.; Borrmann, Andre´ (2011): *Digitale Baustelle - innovativer Planen, effizienter Ausführen. Werkzeuge und Methoden für das Bauen im 21. Jahrhundert*. Berlin: Springer Verlag.

**Habenicht et al., 2014**

Habenicht, Ilka; König, Markus; Marx, Arnim; Spieckermann, Sven; Zeller, Georg (2014): *Simulationsstudien zur Baustellenlogistik und der Bauausführung mit Multimodellen*. In: Raimar Joseph Scherer und Sven-Eric Schapke (Hg.): *Informationssysteme im Bauwesen 2. Anwendungen*. Berlin: Springer Verlag, S. 75–106.

**Hanusrichter,**

Hanusrichter, Mario: *Ein Werkzeug zum Nachweis der ordnungsgemäßen Erbringung von Architekten- und Ingenieurleistungen*.  
Dissertation. Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, Institut für Bauwirtschaft und Baubetrieb.

**Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V., 2016**

Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V. (2016): *KLR Bau. Kosten-, Leistungs- und Ergebnisrechnung der Bauunternehmen*. 8. Auflage. Köln: Rudolf Müller.

**Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V., 2021**

Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V. (2021): *Innovationskraft Bauindustrie. "Wir können mehr als Bauen"*.  
Innovation und Digitalisierung. Berlin.

**Hegemann et al., 2012**

Hegemann, Felix; Lehner, Karlheinz; König, Markus (2012): *IFC-Based Product Modeling for Tunnel Boring Machines*. In: Gudni Gudnason (Hg.): *eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction*. ECPPM 2012. Hoboken: CRC Press, S. 289–296.

**Heinrich, 2005**

Heinrich, Lutz J. (2005): *Forschungsmethodik einer Integrationsdisziplin: Ein Beitrag zur Geschichte der Wirtschaftsinformatik*. In: *International Journal of History and Ethics of Natural Sciences* 13 (2), S. 104–117.

**Helmus et al., 2011**

Helmus, Manfred; Kelm, Agnes; Laußat, Lars; Meins-Becker, Anica (2011): *RFID-Baulogistikleitstand. Forschungsbericht zum Projekt "RFID-unterstütztes Steuerungs- und Dokumentationssystem für die erweiterte Baulogistik am Beispiel Baulogistikleitstand für die Baustelle"*. 1. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.

**Heyl, 2019**

Heyl, Jakob von (2019): *Modellgestütztes Projektcontrolling von Verkehrsinfrastrukturprojekten. Ein Ansatz zur ganzheitlichen Abwicklung*.  
Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart, Institut für Baubetriebslehre.

**Hienz und Scherer, 2014**

Hienz, Robert; Scherer, Raimar Joseph (2014): *Multimodellbasiertes Projektcontrolling*. In: Raimar Joseph Scherer und Sven-Eric Schapke (Hg.):

Informationssysteme im Bauwesen 2. Anwendungen. Berlin: Springer Verlag, S. 167–194.

**Hirschmüller, 2005**

Hirschmüller, H. (2005): *Accurate and Efficient Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information*. In: Cordelia Schmid, Stefano Soatto und Carlo Tomasi (Hg.): IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition: IEEE, S. 807–814.

**Hoffmann et al., 2019**

Hoffmann, Jens; Hörhan, Martin; Jank, Daniel; Steiner, Sabrina (2019): *BIM im Verkehrswegebau*. In: Detlef Heck (Hg.): Bauen neu denken. 5. Internationaler BBB-Kongress. Graz: Verlag der Technischen Universität Graz, S. 277–289.

**Hofstadler, 2019**

Hofstadler, Christian (2019): *Digitalisierung im Baubetrieb. Einsatz der Photogrammetrie zur 3D-Rekonstruktion*. In: Christian Hofstadler (Hg.): Aktuelle Entwicklungen in Baubetrieb, Bauwirtschaft und Bauvertragsrecht. 50 Jahre Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft der TU Graz. Graz: Verlag der Technischen Universität Graz, S. 805–838.

**Horváth et al., 2020**

Horváth, Péter; Gleich, Ronald; Seiter, Mischa (2020): *Controlling*. 14. Auflage. München: Vahlen Franz.

**Hu et al., 2019**

Hu, Chunhua; Pan, Zhou; Li, Pingping (2019): *A 3D Point Cloud Filtering Method for Leaves Based on Manifold Distance and Normal Estimation*. In: *Remote Sensing* 11 (2).

**Hug und Poscheschnik, 2015**

Hug, Theo; Poscheschnik, Gerald (2015): *Empirisch forschen. Studieren, aber richtig*. UVK Verlagsgesellschaft mbH.

**Hussy et al., 2013**

Hussy, Walter; Schreier, Margrit; Echterhoff, Gerald (2013): *Forschungsmethoden in Psychologie und Sozialwissenschaften für Bachelor*. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.

**Ismail und Scherer, 2014**

Ismail, Ali; Scherer, Raimar Joseph (2014): *Simulation von Bauausführungsvarianten mit einem prozessbasierten Simulationsbaukasten*. In: Raimar Joseph Scherer und Sven-Eric Schapke (Hg.): Informationssysteme im Bauwesen 2. Anwendungen. Berlin: Springer Verlag, S. 107–128.

**ISO 12006-3:2007-04, 2007**

ISO 12006-3:2007-04 (2007): *Bauwesen - Organisation von Daten zu Bauwerken - Teil 3: Struktur für den objektorientierten Informationsaustausch*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

**ISO 16739:2013-04, 2013**

ISO 16739:2013-04 (2013): *Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

**ISO/IEC 19510:2013-07, 2013**

ISO/IEC 19510:2013-07 (2013): *Information technology - Object Management Group Business Process Model and Notation*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

**Jaud und Weise, 2019**

Jaud, Štefan; Weise, Matthias (2019): *Aktuelle Situation IFC für Infrastruktur. 2. Okstra/IFC Workshop*.

BIM4INFRA2020. Online verfügbar unter [https://bim4infra.de/wp-content/uploads/2019/02/02\\_19-01-22\\_OKSTRA\\_IFC\\_IFCEntwicklungen\\_Jaud-Weise.pdf](https://bim4infra.de/wp-content/uploads/2019/02/02_19-01-22_OKSTRA_IFC_IFCEntwicklungen_Jaud-Weise.pdf), zuletzt geprüft am 20.02.2022.

**Jehle et al., 2013**

Jehle, Peter; Michailenko, Nikolai; Seyffert, Stefan; Wagner, Steffi (2013): *IntelliBau 2. Das intelligente Bauteil im integrierten Gebäudemodell*. Wiesbaden: Springer Verlag.

**Jubierre und Borrmann, 2014**

Jubierre, Javier Ramos; Borrmann, Andre´ (2014): *A multi-scale product model for shield tunnels based on the Industry Foundation Classes*. Hg. v. Technische Universität München. Lehrstuhl für Computergestützte Modellierung und Simulation (1.0).

**Kaminski, 2010**

Kaminski, Ina (2010): *Potenziale des Building Information Modeling im Infrastrukturprojekt. Neue Methoden für einen modellbasierten Arbeitsprozess im Schwerpunkt der Planung*.

Dissertation. Universität Leipzig, Leipzig, Institut für Stadtentwicklung und Bauwirtschaft.

**Klaubert und Schneider, 2011**

Klaubert, Cornelia; Schneider, Oliver (2011): *Prozessdatengewinnung auf der Baustelle*. In: Willibald A. Günthner und Andre´ Borrmann (Hg.): *Digitale Baustelle - innovativer Planen, effizienter Ausführen. Werkzeuge und Methoden für das Bauen im 21. Jahrhundert*. Berlin: Springer Verlag, S. 237–262.

**Koch, S., 2015**

Koch, Susanne (2015): *Einführung in das Management von Geschäftsprozessen. Six Sigma, Kaizen und TQM*. 2. Auflage. Berlin: Springer Verlag.

**Kochendörfer et al., 2018**

Kochendörfer, Bernd; Liebchen, Jens H.; Viering, Markus G. (2018): *Bau-Projekt-Management*. Wiesbaden: Springer Verlag.

**König, N. et al., 2015**

König, Norbert; Philipp, Christian; Hanisch, B.; Ebert, K.; Gier, T. Bögel, Gerd vom; Henning, Andreas; Lörcks, Martin (2015): *RFID, eine Schlüsseltechnologie*

für transparente Bauwerkserstellung und nachhaltigen Gebäudebetrieb. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.

**König, M. et al., 2018**

König, Markus; Amann, Julian; Borrmann, Andre´; Braun, Matthias; Elixmann, Robert; Eschenbruch, Klaus; Goetz, Alessandra; Hausknecht, Kerstin; Hochmuth, Markus; Liebich, Thomas; Nejatbakhsh, Nazereh; Scheffer, Markus; Singer, Dominic (2018): *Wissenschaftliche Begleitung der BMVI Pilotprojekte von Building Information Modeling im Infrastrukturbau. Materialsammlung*. Berlin. Online verfügbar unter <http://infrabim.de/wp-content/uploads/2016/06/bim-materialsammlung.pdf>, zuletzt geprüft am 20.02.2022.

**König, M., 2021**

König, Markus (2021): *Prozessmodellierung*. In: Andre´ Borrmann, Markus König, Christian Koch und Jakob Beetz (Hg.): *Building Information Modeling. Technologische Grundlagen und industrielle Praxis*. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer Verlag, S. 73–86.

**Koutsoudis et al., 2015**

Koutsoudis, A.; Arnaoutoglou, F.; Pavlidis, G. (2015): *Structure from Motion – Multiple View Stereovision. An Introduction on how to perform SFM/MVS*. In: *DIGARCH 2015*, S. 1–20.

**Langlotz und Bimber, 2013**

Langlotz, Tobias; Bimber, Oliver (2013): *Unsynchronized 4D Barcodes. Coding and Decoding Time-Multiplexed 2D Colorcodes*. Bauhaus-Universität Weimar. Weimar. Online verfügbar unter [https://e-pub.uni-weimar.de/opus4/frontdoor/deliver/index/docId/853/file/4D-Barcodes\\_pdfa.pdf](https://e-pub.uni-weimar.de/opus4/frontdoor/deliver/index/docId/853/file/4D-Barcodes_pdfa.pdf), zuletzt geprüft am 20.02.2022.

**Leica Geosystems AG, 2016**

Leica Geosystems AG (2016): *Leica Geosystems Katalog für den Bau Werkzeuge für alle Fälle*. Online verfügbar unter <https://leica-geosystems.com/de-de/products/gnss-systems/smart-antennas/leica-gs18-t>, zuletzt geprüft am 20.02.2022.

**Leimböck et al., 2015**

Leimböck, Egon; Klaus, Ulf Rüdiger; Hölkermann, Oliver (2015): *Baukalkulation und Projektcontrolling. Unter Berücksichtigung der KLR Bau und der VOB*. 13. Auflage. Wiesbaden: Springer Verlag.

**Leitner und Wroblewski, 2005**

Leitner, Andrea; Wroblewski, Angela (2005): *Zwischen Wissenschaftlichkeitsstandards und Effizienzansprüchen. ExpertInneninterviews in der Praxis der Arbeitsmarktevaluation*. In: Alexander Bogner, Beate Littig und Wolfgang Menz (Hg.): *Das Experteninterview. Theorie, Methode, Anwendung*. 2. Aufl. Wiesbaden: Springer Verlag, S. 241–256.

**Lenk, 2007**

Lenk, Bernhard (2007): *Handbuch der automatischen Identifikation*. 3. Auflage. Kirchheim unter Teck: Lenk.

**Lorenzen, 1974**

Lorenzen, Paul (1974): *Konstruktive Wissenschaftstheorie*. 2. Aufl.: Suhrkamp Verlag.

**Lowe, 2004**

Lowe, David G. (2004): *Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints*. In: *International Journal of Computer Vision* 60 (2), S. 91–110.

**Luhmann, 2018a**

Luhmann, Thomas (2018): *Bildbasierte 3D-Oberflächenrekonstruktion – Möglichkeiten und Grenzen*. In: Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement - DVW e.V. (Hg.): UAV 2018. Vermessung mit unbemannten Flugsystemen. Augsburg: Wißner-Verlag (89), S. 31–44.

**Luhmann, 2018b**

Luhmann, Thomas (2018): *Nahbereichsphotogrammetrie. Grundlagen - Methoden - Beispiele*. 4. Auflage. Berlin: Wichmann.

**Marihal, 2021**

Marihal, Nagaratna (2021): *Comparative analysis of point cloud methods for project performance management of BIM infrastructures*. Masterthesis. Bauhaus-Universität Weimar, Weimar, Professur Baubetrieb und Bauverfahren - Betreuer: Walther, Tino.

**Martinsen, 2017**

Martinsen, Ulfert (2017): *Kostenrechnung in der Bauwirtschaft. Praxisleitfaden unter Einbeziehung der KLR-Bau 2016*. 1. Auflage. Berlin: Ernst & Sohn.

**Marzouk und Hisham, 2014**

Marzouk, Mohamed; Hisham, Mohamed (2014): *Implementing earned value management using bridge information modeling*. In: *Journal of Civil Engineering - KSCE* 18 (5), S. 1302–1313.

**Mayer, 2013**

Mayer, Horst Otto (2013): *Interview und schriftliche Befragung. Grundlagen und Methoden empirischer Sozialforschung*. 6. Auflage: Oldenburg Wissenschaftsverlag.

**Mayr, 2005**

Mayr, Herwig (2005): *Projekt Engineering. Ingenieurmäßige Softwareentwicklung in Projektgruppen*. 2. Auflage. München: Carl Hanser Verlag.

**Mayring, 2016**

Mayring, Philipp (2016): *Einführung in die qualitative Sozialforschung*. 6. Auflage. Weinheim: Beltz.

**Mayring und Fenzl, 2019**

Mayring, Philipp; Fenzl, Thomas (2019): *Qualitative Inhaltsanalyse*. In: Nina Baur

und Jörg Blasius (Hg.): Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer Verlag, S. 633–648.

**Metzner, 2020**

Metzner, Anja (2020): *Software-Engineering - kompakt*. München: Carl Hanser Verlag.

**Meuser und Nagel, 2005**

Meuser, Michael; Nagel, Ulrike (2005): *ExpertInneninterviews - vielfach erprobt, wenig bedacht. Ein Beitrag zur qualitativen Methodendiskussion*. In: Alexander Bogner, Beate Littig und Wolfgang Menz (Hg.): *Das Experteninterview. Theorie, Methode, Anwendung*. 2. Aufl. Wiesbaden: Springer Verlag, S. 71–94.

**Mieg und Näf, 2005**

Mieg, Harald A.; Näf, Matthias (2005): *Experteninterviews in den Umwelt- und Planungswissenschaften. Eine Einführung und Anleitung*. 2. Auflage. ETH Zürich, Zürich, Institute of Human-Environment Systems.

**Motzko, 2013**

Motzko, Christoph (2013): *Praxis des Bauprozessmanagements. Termine, Kosten und Qualität zuverlässig steuern*. Berlin: Ernst & Sohn.

**Noack, 2019**

Noack, Gerold (2019): *Geodäsie für Bauingenieure und Architekten. Grundlagen und Praxiswissen*. München: Carl Hanser Verlag.

**Obergrießer, 2017**

Obergrießer, Mathias (2017): *Digitale Werkzeuge zur integrierten Infrastrukturbauwerksplanung. Am Beispiel des Schienen- und Straßenbaus*. Wiesbaden: Springer Verlag.

**Oepen, 2003**

Oepen, Ralf-Peter (2003): *Phasenorientiertes Controlling in bauausführenden Unternehmen unter Berücksichtigung einer zweigliedrigen Arbeitskalkulation*. Dissertation. Technische Universität Bergakademie Freiberg, Freiberg, Baubetriebswirtschaftslehre und Infrastrukturmanagement.

**Oepen und Keidel, 2018**

Oepen, Ralf-Peter; Keidel, Christian (2018): *Controlling*. In: Dieter Jacob, Clemens Müller und Martin Oehmichen (Hg.): *Kalkulieren im Ingenieurbau. Strategie - Kalkulation - Controlling. Leitfaden des Baubetriebs und der Bauwirtschaft*. 3. Auflage. Berlin: Springer Verlag, S. 523–571.

**Omar, H. et al., 2018**

Omar, Hany; Mahdjoubi, Lamine; Kheder, Gamal (2018): *Towards an automated photogrammetry-based approach for monitoring and controlling construction site activities*. In: *Computers in Industry* (98), S. 172–182.

**Omar, T. und Nehdi, 2016**

Omar, Tarek; Nehdi, Moncef L. (2016): *Data acquisition technologies for construction progress tracking*. In: *Automation in Construction* (70), S. 143–155.

**Patton, 2002**

Patton, Michael Quinn (2002): *Qualitative research & evaluation methods*. 3. Auflage. Thousand Oaks: Sage.

**Patzak, 1982**

Patzak, Gerold (1982): *Systemtechnik - Planung komplexer innovativer Systeme. Grundlagen, Methoden, Techniken*. Berlin: Springer Verlag.

**Pfadenhauer, 2005**

Pfadenhauer, Michaela (2005): *Auf gleicher Augenhöhe reden. Das Experteninterview - ein Gespräch zwischen Experte und Quasi-Experte*. In: Alexander Bogner, Beate Littig und Wolfgang Menz (Hg.): *Das Experteninterview. Theorie, Methode, Anwendung*, 113 - 130. 2. Aufl. Wiesbaden: Springer Verlag.

**Pflug, 2008**

Pflug, Christoph (2008): *Ein Bildinformationssystem zur Unterstützung der Bauprozesssteuerung*.

Dissertation. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, Institut für Baubetrieb.

**Pieper, 2019**

Pieper, Marianne (2019): *Digitalisierung des Baustellen-Controllings – Empirische Analyse zum Status Quo und zukünftigen Entwicklungen*. Masterthesis. Bauhaus-Universität Weimar, Weimar, Professur Baubetrieb und Bauverfahren - Betreuer: Walther, Tino.

**Pollefeys et al., 2004**

Pollefeys, Marc; van Gool, Luc; Vergauwen, Maarten; Verbiest, Frank; Cornelis, Kurt; Tops, Jan; Koch, Reinhard (2004): *Visual Modeling with a Hand-Held Camera*. In: *International Journal of Computer Vision* 59 (3), S. 207–232.

**Preissler, 2014**

Preissler, Peter R. (2014): *Controlling. Lehrbuch und Intensivkurs*. 14. Auflage. Oldenburg: De Gruyter.

**Pučko et al., 2018**

Pučko, Zoran; Šuman, Nataša; Rebolj, Danijel (2018): *Automated continuous construction progress monitoring using multiple workplace real time 3D scans*. In: *Advanced Engineering Informatics* (38), S. 27–40.

**REB 23.003, 2009**

REB 23.003 (2009): *REB-Verfahrensbeschreibung 23.003 Allgemeine Mengenermittlung. Sammlung für die Regelungen der elektronischen Bauabrechnung*.

**REB Allgemein, 2012**

REB Allgemein (2012): *Allgemeine Bedingungen für die Anwendung der REB-Verfahrensbeschreibungen. Sammlung der Regelungen für die elektronische Bauabrechnung*.

**Reichmann et al., 2017**

Reichmann, Thomas; Kißler, Martin; Baumöl, Ulrike (2017): *Controlling mit Kennzahlen: Die systemgestützte Controlling-Konzeption*. München: Vahlen.

**Remondino et al., 2012**

Remondino, Fabio; Del Pizzo, Silvio; Kersten, Thomas P.; Troisi, Salvatore (2012): *Low-Cost and Open-Source Solutions for Automated Image Orientation – A Critical Overview*. In: David Hutchison, Takeo Kanade, Josef Kittler, Jon M. Kleinberg, Friedemann Mattern, John C. Mitchell et al. (Hg.): *Progress in Cultural Heritage Preservation. Lecture Notes in Civil Engineering*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, S. 40–54.

**Reschke, 1989**

Reschke, Hasso (1989): *Handbuch Projekt-Management*. Köln: Verlag TÜV Rheinland.

**Rolf, 2021**

Rolf, Tobias (2021): *Digitale Baufortschrittskontrolle unter Verwendung von Punktwolkenaufnahmen im Tiefbau*.  
Masterthesis. Bauhaus-Universität Weimar, Weimar, Professur Baubetrieb und Bauverfahren; Betreuer: Tino Walther.

**Rusch, 2011**

Rusch, Gebhard (2011): *Konstruktivismus und Systemanalyse*. In: Sibylle Moser (Hg.): *Konstruktivistisch forschen. Methodologie, Methoden, Beispiele*. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer Verlag, S. 172–201.

**Sachse et al., 1998**

Sachse, Pierre; Hacker, Winfried; Leinert, Sven; Riemer, Simone (1998): *Prototyping als Unterstützungsmöglichkeit des Denkens und Handelns beim Konstruieren*. Dresden: Verlag Technische Universität Dresden Institut für Allgemeine Psychologie und Methoden der Psychologie.

**Sacks et al., 2018**

Sacks, Rafael; Eastman, Charles M.; Lee, Ghang; Teicholz, Paul M. (2018): *BIM handbook. A guide to building information modeling for owners, designers, engineers, contractors, and facility managers*. 3. Auflage. New Jersey: Wiley.

**Schapke et al., 2014**

Schapke, Sven-Eric; Kadolsky, Mathias; Scherer, Raimar Joseph (2014): *Ontologieframework*. In: Raimar Joseph Scherer und Sven-Eric Schapke (Hg.): *Informationssysteme im Bauwesen 1. Modelle, Methoden und Prozesse*. Berlin: Springer Verlag, S. 87–114.

**Schapke et al., 2018**

Schapke, Sven-Eric; Beetz, Jakob; König, Markus; Koch, Christian (2018): *Collaborative Data Management*. In: Andre´ Bormann, Markus König, Christian Koch und Jakob Beetz (Hg.): *Building Information Modeling. Technology Foundations and Industry Practice*. Cham: Springer Verlag, S. 251–277.

**Scherer und Schapke, 2014**

Scherer, Raimar Joseph; Schapke, Sven-Eric (2014): *Multimodellbasierte Zusammenarbeit in Bauprojekten*. In: Raimar Joseph Scherer und Sven-Eric Schapke (Hg.): *Informationssysteme im Bauwesen 1. Modelle, Methoden und Prozesse*. Berlin: Springer Verlag, S. 3–38.

**Schneeweiß, 1991**

Schneeweiß, Christoph (1991): *Planung. Systemanalytische und entscheidungstheoretische Grundlagen*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.

**Schober und Hoff, 2016**

Schober, Kai-Stefan; Hoff, Philipp (2016): *Digitalisierung der Bauwirtschaft. Der europäische Weg zu "Construction 4.0"*. Hg. v. Roland Berger GmbH Competence Center Civil Economics, Energy & Infrastructure. München, Germany (Think act beyond mainstream).

**Schreyer, 2016**

Schreyer, Marcus (2016): *BIM in der Bauausführung*. In: DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (Hg.): *BIM - Einstieg kompakt für Bauunternehmer. BIM-Methoden für die Bauausführung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, S. 43–52.

**Schreyer und Pflug, 2018**

Schreyer, Marcus; Pflug, Christoph (2018): *BIM in Industrial Prefabrication for Construction*. In: André Borrmann, Markus König, Christian Koch und Jakob Beetz (Hg.): *Building Information Modeling. Technology Foundations and Industry Practice*. Cham: Springer Verlag, S. 413–420.

**Seyfferth, 2003**

Seyfferth, Günter (2003): *Praktisches Baustellen-Controlling. Handbuch für Bau- und Generalunternehmen*. 1. Auflage. Braunschweig: Vieweg.

**Silbe und Díaz, 2017**

Silbe, Katja; Díaz, Joaquín (2017): *BIM-Ratgeber für Bauunternehmer. Grundlagen, Potenziale, erste Schritte*. Köln: Rudolf Müller.

**Steinmann, 2018**

Steinmann, Rasso (2018): *IFC Certification of BIM Software*. In: André Borrmann, Markus König, Christian Koch und Jakob Beetz (Hg.): *Building Information Modeling. Technology Foundations and Industry Practice*. Cham: Springer Verlag, S. 139–153.

**Tibes, 2019**

Tibes, Lucas (2019): *Optimierung der Abwicklung von Bauprojekten durch wissensbasiertes Risikomanagement*. Dissertation. Bauhaus-Universität Weimar, Weimar, Professur Betriebswirtschaftslehre im Bauwesen.

**Tulke und Schumann, 2018**

Tulke, Jan; Schumann, René (2018): *BIM Manager*. In: André Borrmann, Markus König, Christian Koch und Jakob Beetz (Hg.): *Building Information Modeling*.

Technology Foundations and Industry Practice. Cham: Springer Verlag, S. 293–302.

**Turkan et al., 2012**

Turkan, Yelda; Bosche, Frederic; Haas, Carl T.; Haas, Ralph (2012): *Automated progress tracking using 4D schedule and 3D sensing technologies*. In: *Automation in Construction* (22), S. 414–421.

**Tuttas, 2017**

Tuttas, Sebastian Andreas (2017): *Erfassung von Bauteilen durch photogrammetrische Punktwolken und Abgleich eines 4D-Bauwerkmodells zur Baufortschrittskontrolle*.

Dissertation. Universitätsbibliothek der TU München, München, Professur für Photogrammetrie und Fernerkundung.

**Urban et al., 2016**

Urban, Steffen; Leitloff, Jens; Hinz, Stefan (2016): *Mlpnp – A real -Time Maximum Likelihood Solution to the perspective -n- point problem*. In: *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences III-3*, S. 131–138.

**Vala, 2020**

Vala, Parimal (2020): *BIM Infrastructure Projects Performance Control with Point Cloud*.

Masterthesis. Bauhaus-Universität Weimar, Weimar, Professur Baubetrieb und Bauverfahren - Betreuer: Walther, Tino.

**Valero et al., 2015**

Valero, Enrique; Adán, Antonio; Cerrada, Carlos (2015): *Evolution of RFID Applications in Construction: A Literature Review*. In: *Sensors* (7), S. 15988–16008.

**Vick und Brilakis, 2018**

Vick, Steven; Brilakis, Ioannis (2018): *Road Design Layer Detection in Point Cloud Data for Construction Progress Monitoring*. In: *Journal of Computing in Civil Engineering* 32 (5).

**VOB, 2019**

VOB (2019): *VOB - Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen. Ausgabe 2019*. Berlin, Wien, Zürich: Beuth Verlag GmbH.

**Walther, 2019**

Walther, Tino (2019): *Ein Modell zur automatisierten Datenerfassung und Abbildung der Leistung im Infrastrukturbau*. In: Shervin Haghsheno, Kunibert Lennerts und Sascha Gentes (Hg.): 30. BBB-Assistententreffen in Karlsruhe - Fachkongress der wissenschaftlichen Mitarbeiter Bauwirtschaft | Baubetrieb | Bauverfahrenstechnik. Karlsruher Institut für Technik. Karlsruhe, Baden: KIT Scientific Publishing, S. 320–339.

**Walther et al., 2020**

Walther, Tino; Pieper, Marianne; Bargstädt, Hans-Joachim (2020): *Site controlling in infrastructure projects by digital methods*. In: IABSE Congress Christchurch 2021 (Hg.): Resilient Technologies for Sustainable Infrastructures. Christchurch. Zürich: ETH Zürich, S. 521–528.

**Walther et al., 2021**

Walther, Tino; Mellenthin Filardo, Martina; Marihal, Nagaratna; Bargstädt, Hans-Joachim (2021): *Project controlling of road construction sites as a comparison of as-built and as planned models using convex hull algorithm*. In: Vitaly Semenov und Raimar Joseph Scherer (Hg.): ECPPM 2021. 13th European Conference on Product & Process Modelling. Moskau: CRC Press/Balkema.

**Walther und Bargstädt, 2019**

Walther, Tino; Bargstädt, Hans-Joachim (2019): *Automated data acquisition to show the actual performance during the construction process*. In: IABSE (Hg.): 20th Congress of IABSE New York City 2019. The Evolving Metropolis. New York. Schweiz: ETH Zürich, S. 1566–1573.

**Weichbold, 2019**

Weichbold, Martin (2019): *Pretest*. In: Nina Baur und Jörg Blasius (Hg.): Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer Verlag, S. 349–356.

**Wirth, 2015**

Wirth, Volker (2015): *Controlling in der Baupraxis. So sichern Sie Ihre Baustellengewinne*. 3. Auflage. Köln: Bundesanzeiger Verlag.

**Wöhe et al., 2016**

Wöhe, Günter; Döring, Ulrich; Brösel, Gerrit (2016): *Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre*. 26. Auflage. München: Verlag Franz Vahlen.

**Wrona, 2005**

Wrona, Thomas (2005): *Die Fallstudienanalyse als wissenschaftliche Forschungsmethode*. Hg. v. Thomas Wrona. Lehrstuhl für Organisation und empirische Managementforschung. Berlin.

**Wujanz und Clemen, 2019**

Wujanz, Daniel; Clemen, Christian (2019): *Ebenenbasiertes Baufortschrittsmonitoring unter Verwendung von terrestrischen Laserscans*. Hg. v. Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand vom BMWi.

**Zhang und Arditi, 2013**

Zhang, Chengyi; Arditi, David (2013): *Automated progress control using laser scanning technology*. In: *Automation in Construction* (36), S. 108–116.

**Zirkler et al., 2019**

Zirkler, Bernd; Nobach, Kai; Hofmann, Jonathan; Behrens, Sabrina (2019): *Projektcontrolling. Leitfaden für die betriebliche Praxis*. Wiesbaden: Springer Verlag.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Einordnung der vorliegenden Arbeit in die Baubetriebswissenschaft .....	19
Abbildung 2: Zyklus zur Erreichung des Wissenstands.....	20
Abbildung 3: Struktur der Arbeit.....	22
Abbildung 4: Kreislauf der Controllingaktivitäten.....	24
Abbildung 5: Struktur vom Bauunternehmenscontrolling bis zur Leistungsmeldung.....	25
Abbildung 6: Begriffsabgrenzung und Verlauf der Ergebnisrechnung .....	27
Abbildung 7: Deckungsbeitrag bei modifizierter Leistungsbewertung .....	30
Abbildung 8: Bauprozesssteuerung auf Basis des Soll-Ist-Vergleiches .....	33
Abbildung 9: Folgen von rechtzeitigen und verspäteten Controllingmaßnahmen.....	33
Abbildung 10: Aufmaß als Grundlage der Mengenermittlung.....	36
Abbildung 11: Spezialisiertes Multimodell.....	42
Abbildung 12: Auswertung des Ist-Zustandes.....	47
Abbildung 13: Erfassungsmethoden zur automatisierten Abbildung des Bauzustandes .....	48
Abbildung 14: Schematischer Aufbau eines Systems.....	54
Abbildung 15: Forschungsprozess der empirischen Studie.....	61
Abbildung 16: Vierstufige Auswertung .....	62
Abbildung 17: Inhaltliche Einordnung und Auswertung.....	63
Abbildung 18: Aktuelle Ausprägung der Bauleistungsfeststellung und Leistungsmeldung ....	64
Abbildung 19: FB 2 Leistungserfassung .....	65
Abbildung 20: FB 3 Prozess der Leistungsmeldung.....	68
Abbildung 21: FB 4 Soll-Ist-Vergleiche .....	70
Abbildung 22: Digitale Ansätze der Bauleistungsfeststellung und Leistungsmeldung .....	72
Abbildung 23: FB 2 Leistungserfassung – digitale Anwendung.....	73
Abbildung 24: FB 5 BIM.....	77
Abbildung 25: Ausblick der Bauleistungsfeststellung und Leistungsmeldung.....	80
Abbildung 26: Verfahrensweise zur Priorisierung der Anforderungen .....	85
Abbildung 27: Strukturierung der Anforderungen.....	86
Abbildung 28: Prozentuale Verteilung der Priorisierung nach Themenfeldern .....	100
Abbildung 29: Absolute Verteilung der Priorisierung nach Themenfeldern.....	101
Abbildung 30: Schematischer Aufbau Zielsystem .....	104
Abbildung 31: Schematischer Aufbau Produktsystem.....	105
Abbildung 32: Schematischer Aufbau Handlungsträgersystem.....	106
Abbildung 33: Überblick zu den Bestandteilen des Handlungssystems .....	107
Abbildung 34: Zeitliche Einordnung und Prozess der Bauleistungsfeststellung sowie von deren Hauptprozessen – Ebene 1 .....	108
Abbildung 35: Aufnahme Bautenstand – Ebene 2 .....	109
Abbildung 36: Auswertung der Daten – Ebene 3 .....	110
Abbildung 37: Bewertung Fertigstellungsgrad – Ebene 2 .....	112
Abbildung 38: Schematische Darstellung des Voxel-Downsamplings für den Straßenbau .	113
Abbildung 39: Vereinheitlichung der Punktwolke für den Straßen- und Tiefbau – Ebene 3.	113
Abbildung 40: Schematische Darstellung Punktwolkenvergleich .....	115

---

Abbildung 41: Exemplarische Projektion der rasterbasierten Ergebnisse auf die Trasse ....	115
Abbildung 42: Exemplarische Darstellung zur Wahrscheinlichkeitsberechnung der Schicht_i unter Normalverteilung .....	116
Abbildung 43: Exemplarische Abbildung einer ausgewerteten Punktwolke.....	117
Abbildung 44: Exemplarische Abbildung der variablen Unterteilung des Schichtenaufbaus mit überlappender Punktwolke .....	117
Abbildung 45: Schematische Darstellung der Auswertung 3D-Modell zu <i>Punktwolke</i> .....	118
Abbildung 46: Modifizierte Leistungsbewertung – Ebene 2.....	119
Abbildung 47: Integration Fertigstellungsgrad - Ebene 3 .....	119
Abbildung 48: Schematische und exemplarische Darstellung nach Stationen zur Analyse des Fertigstellungsgrades pro Schicht/ Bauteil.....	120
Abbildung 49: Exemplarische Darstellung zur Auswertung nach Stationierung.....	121
Abbildung 50: Exemplarische Darstellung mehrheitlich zugeordneter Rasterzellen .....	122
Abbildung 51: Auswertung Bauleistungsfeststellung – Ebene 2.....	124
Abbildung 52: Schematischer Aufbau Systemzusammenhang .....	126
Abbildung 53: Lageplan und Punktwolkenaufnahme des Beispielszenarios .....	130
Abbildung 54: Darstellung der Auswertung des Prozesses Vergleich Soll- zu Ist-Daten (Punktwolke zu Punktwolke).....	131
Abbildung 55: Auswertung Fertigstellungsgrad von 0+165,85 bis 0+269,00 .....	131
Abbildung 56: Darstellung der Auswertung des Prozesses Vergleich Soll- zu Ist-Daten (3D-Modell zu Punktwolke).....	132
Abbildung 57: Auswertung Fertigstellungsgrad von 0+269,00 bis 0+607,00 .....	133
Abbildung 58: Ausschnitt des Modells der Bundesautobahn 7.....	134
Abbildung 59: Visualisierung des ausgewerteten Fertigstellungsgrads.....	137
Abbildung 60: Darstellung fertiggestellter Schichtbereiche .....	138
Abbildung 61: Verhältnis von Priorisierung und Erfüllungsgrad der Anforderungen .....	143

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Grundsätze des Projektcontrollings.....	24
Tabelle 2: Abgrenzung diverser Mengen bez. der Leistungsermittlung.....	27
Tabelle 3: Mindestanforderung an Metadaten .....	39
Tabelle 4: Priorisierungsstufen der Anforderungen.....	87
Tabelle 5: Anforderungen an die Leistungserfassung.....	87
Tabelle 6: Anforderungen an die Leistungsmeldung.....	88
Tabelle 7: Anforderung an die Prozessgestaltung .....	91
Tabelle 8: Anforderung an die Prozessintegration .....	93
Tabelle 9: Anforderung an die Eingabe der Daten .....	95
Tabelle 10: Anforderungen an die Datenverarbeitung.....	95
Tabelle 11: Anforderungen an die Ausgabe der Daten .....	97
Tabelle 12: Anforderungen an die Benutzerfreundlichkeit.....	98
Tabelle 13: Anforderungen an die Informationsaufbereitung.....	98
Tabelle 14: Quantitative Auswertung der priorisierten Anforderungen .....	99
Tabelle 15: Ausschnitt zu implementierender Datenbank .....	135
Tabelle 16: Ausschnitt der Ist-Daten[bank] .....	136
Tabelle 17: Erfüllungsgrad der Anforderungen .....	139
Tabelle 18: Exemplarischer Ausschnitt zur qualitativen Bedarfserfüllung.....	140
Tabelle 19: Darstellung der quantitativen Bedarfserfüllung.....	142

## **Anlagenverzeichnis (separater Druckband)**

<b>Anlage 1 – Dateninventar Interviews.....</b>	<b>169</b>
<b>Anlage 2 – Leitfragebogen.....</b>	<b>173</b>
<b>Anlage 3 – Ausgangssituation empirische Studie .....</b>	<b>177</b>
<b>Anlage 4 – Kodierungssystem Interviews .....</b>	<b>179</b>
<b>Anlage 5 – Auswertungstabelle Interviews.....</b>	<b>184</b>
<b>Anlage 6 - Anforderungsdatenbank.....</b>	<b>534</b>
<b>Anlage 7 – Vorbereitung der Aufnahme.....</b>	<b>547</b>
<b>Anlage 8 – Durchführung der Aufnahme .....</b>	<b>549</b>
<b>Anlage 9 – Softwarebasierte Bearbeitung der Daten zur grafischen Darstellung.....</b>	<b>551</b>
<b>Anlage 10 – Ableitung synthetischer Punktwolken .....</b>	<b>553</b>
<b>Anlage 11 – Aktualisierung Arbeitskalkulation .....</b>	<b>555</b>
<b>Anlage 12 – Systemübergreifender Prozess der Bauleistungsfeststellung.....</b>	<b>557</b>
<b>Anlage 13 – Evaluierung Bedarfserfüllung.....</b>	<b>559</b>

**Hinweis: Alle Anlagen sind über den nachfolgenden Link abrufbar.**

<https://doi.org/10.25643/bauhaus-universitaet.4911>

## Schriften der Professur Baubetrieb und Bauverfahren

Nr.	Jahr	Titel
1	2000	<b>45 Jahre Baubetrieb und Bauverfahren in Weimar</b>
2	2000	<b>Tag des Baubetriebs 2000 – Tagungsbeiträge</b>
3	2001	<b>2. Fachtagung Sicherheit auf Baustellen</b>
4	2002	<b>2. Tag des Baubetriebs 2002 – Tagungsbeiträge – Über den Strukturwandel zur Konjunktur: Innovation – Qualität – Zahlungssicherheit</b>
5	2003	<b>3. Fachtagung Sicherheit auf Baustellen</b>
6	2004	<b>3. Tag des Baubetriebs 2004 – Tagungsbeiträge – Planungshaftung in der Bauausführung</b>
7	2005	<b>Stefan Weyhe: Bauschadensprophylaxe als Beitrag zur Qualitätssicherung während der Bauausführung, Dissertation</b>
8	2005	<b>4. Fachtagung Sicherheit auf Baustellen: Erfahrung – Arbeitssicherheit - Leistung</b>
9	2005	<b>Grundlagen des Baubetriebswesens – ein kurzer Überblick, Lehrunterlage</b>
10	2005	<b>Die Professur Baubetrieb und Bauverfahren 2000 bis 2005</b>
11	2005	Raghavendra Kulkarni: <b>An Algorithm for Decision-making at the Front-end in International Project Management, Dissertation</b>
12	2006	<b>4. Tag des Baubetriebs 2004 – Tagungsbeiträge – Nachtragsmanagement in Praxis und Forschung</b>
13	2006	Arno Blickling: <b>Spezifikation des Bau-Solls durch interaktive Modellierung auf virtuellen Baustellen, Dissertation</b>
14	2007	<b>5. Fachtagung Sicherheit auf Baustellen „Gesund arbeiten bis zur Rente“</b>
15	2007	Norbert Krudewig: <b>Streitbeilegungsmodell für die deutsche Bauwirtschaft, Dissertation</b>
16	2007	Barbara Leydolph: <b>Ausbau von Fugendichtstoffen im Rahmen von Gebäuderückbau und Sanierung, Dissertation</b>
17	2008	<b>5. Tag des Baubetriebs 2008 – Tagungsbeiträge – Auf dem Weg zum digitalen (Bau-)haus-Bau</b>
18	2008	<b>Grundlagen des Baubetriebswesens – Skript zur Vorlesung, Lehrunterlage</b>
19	2010	<b>6. Tag des Baubetriebs 2010 – Tagungsbeiträge – Modellierung von Prozessen zur Fertigung von Unikaten</b>
20	2010	<b>Grundlagen des Baubetriebswesens – Skriptum zur Vorlesung, Lehrunterlage, 3. überarbeitete Auflage</b>
21	2011	Bargstädt, H.-J.; Ailland, K. (Hrsg.): <b>Proceedings of the 11th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality, Germany, Weimar Nov. 3-4, 2011</b>
22	2012	Antje Hegwald: <b>Strategische Handlungsempfehlungen für die technische Bewirtschaftung von Wohnungsbeständen, Dissertation</b>
23	2012	Ulrike Beißert: <b>Constraint-basierte Simulation zur Terminplanung von Ausführungsprozessen: Repräsentation baubetrieblichen Wissens mittels Soft Constraints, Dissertation</b>
24	2012	Heinrich Best: <b>Kooperationsstrategien spezialisierter Ingenieurberatungsunternehmen im internationalen Wettbewerb, Dissertation</b>
25	2012	Dirk Orbanz: <b>Budgetierung im Straßenbetriebsdienst - Bestimmungsfaktoren und der Einfluss von Straßenzustand und Verkehrsstärke, Dissertation</b>
26	2013	<b>Tagungsband zum 24. Assistententreffen der wissenschaftlichen Mitarbeiter der Bereiche Bauwirtschaft, Baubetrieb und der Bauverfahrenstechnik, Fachtagung an der Bauhaus-Universität Weimar</b>
27	2013	Amir Elmahdi: <b>Grid Based Simulation Model for Workspace Management and Analysis, Dissertation</b>

Nr.	Jahr	Titel
28	2013	Anne Alexander: <b>Quantitative Erfassung von Risiken und Simulation ihrer Auswirkungen auf den Verlauf eines Bauprojektes</b> , Dissertation
29	2013	Karin Ailland: <b>Ereignisbasierte Abbildung von Bau-Ist-Zuständen</b> , Dissertation
30	2013	<b>Grundlagen des Baubetriebswesens - Skriptum zur Vorlesung</b> , Lehrunterlage, 4. überarbeitete Auflage
31	2014	Hong Ha Le: <b>A model for manpower relocation considering the impact derived from weather forecasts</b> , Dissertation
32	2014	Dang Thi Trang: <b>Automated Detailing of 4D Schedules</b> , Dissertation
33	2014	Julia K. Voigtmann: <b>Simulation bauleistungsbezogener Prozesse</b> , Dissertation
34	2016	Sebastian Hollermann: <b>An object-oriented Approach for knowledge-based Project planning</b> , Dissertation
35	2016	<b>Grundlagen des Baubetriebswesens - Skriptum zur Vorlesung</b> , Lehrunterlage, 4. überarbeitete Auflage
36	2017	Jürgen Melzner: <b>Ein Modell zur objektorientierten Gefährdungsbeurteilung im Hochbau</b> , Dissertation
37	2017	Abdur Rehman Nasir: <b>A digital Task Instruction Model for low skilled construction workforce</b> , Dissertation
38	2019	Beate Massa: <b>Methodenentwicklung für die Abwicklung des anlagentechnischen Brandschutzes komplexer Bauprojekte unter Betrieb</b> , Dissertation
39	2021	Judith Fauth: <b>Ein handlungsorientiertes Entscheidungsmodell zur Feststellung der Genehmigungsfähigkeit von Bauvorhaben</b>
40	2021	Stefan Hörold: <b>Leistungsbezogene Musterjahresganglinien für den Straßenbetriebsdienst</b> , Dissertation
41	2023	Franziska Weise: <b>Erfolgskritische Faktoren in exemplarischen Building Information Modeling-Anwendungsfällen: Eine Analyse unter der Beachtung schleppender Digitalisierung und organisationaler Veränderungen</b> , Dissertation
42	2023	Nadine Wills: <b>Modell bedarfsorientierter Leistungserbringung im FM auf Grundlage von Sensortechnologien und BIM</b> , Dissertation
43	2023	Tino Walther: <b>Ein Modell zur Optimierung der Bauleistungsfeststellung von Linienbaustellen</b> , Dissertation

Schriften der Professur Baubetrieb und Bauverfahren  
ISBN 978-3-96567-091-4