

Einflüsse der Digitalisierung auf Baustellenarbeitsprozesse

Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von
Thomas Kölzer

aus
Siegen

2021

DOI: <https://doi.org/10.15480/882.3585>

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Frank Schmidt-Döhl (TUHH)

Prof. Dr.-Ing. Kay Smarsly (TUHH)

Prof. Daniel Mondino (HCU)

Tag der mündlichen Prüfung:

28. April 2021

Kurzfassung

Die mannigfaltigen Veränderungen, die im Bauwesen durch die Effekte der Digitalisierung hervorgerufen werden, beeinflussen zunehmend auch die Arbeitsprozesse auf Baustellen. Um auf die bereits stattfindenden und v. a. auch zukünftig vermehrt anstehenden Modifikationen adäquat reagieren zu können, werden in der vorliegenden Arbeit die vielfach interdependenten und häufig sehr komplexen Zusammenhänge, die bei der Errichtung von Bauwerken ineinandergreifen, erfasst und analysiert.

Zu Beginn ist der aktuelle Stand zu potenziellen digitalen Arbeits- und Hilfsmitteln aufgeführt. Auf Grundlage einer erstellten Kategorisierung zu innovativen Werkzeugen für Baustellentätigkeiten wird erörtert, wie sich neue und zukunftsweisende Technologien auf die häufig rein handwerklichen Vorgänge auswirken. So treten aufgrund vielfältiger Implementierungen nicht nur Veränderungen im Rahmen losgelöster Arbeitshandlungen auf, es finden v. a. auch Umgestaltungen bekannter Abläufe, Anpassungen konventioneller Rollenbilder oder Neuausrichtungen bestehender Kommunikationsformen statt. Im Zuge der Analyse konnte festgehalten werden, dass insbesondere die Methode BIM einen großen Einfluss auf die vorhandenen, meist analogen Informatisierungsprozesse ausübt.

Die Einbindung innovativer Technologien ruft im Zuge der Digitalisierung ebenfalls immer stärker zunehmende Mensch-Maschine-Interaktionen hervor, die es in Analysen zu Einflüssen neuartiger Arbeits- und Hilfsmittel, z. B. in Form von Augmented Reality-Anwendungen oder durch wachsende Robotereinbindungen, stets zu berücksichtigen gilt. Gerade im Bauwesen sind neben verschiedenen baustellenspezifischen Faktoren, wie Wetterabhängigkeit oder Schmutzbelastungen, insbesondere auch die nicht repetitiven Arbeitstätigkeiten vor Ort in den Fokus zu rücken. Unter Berücksichtigung vielfältiger brancheninhärenter Aspekte konnte gezeigt werden, dass viele Vorgänge im Bauhandwerk nur bedingt substituier- bzw. automatisierbar sind.

Da im Bauwesen viele kleine und mittelständische Unternehmen zu finden sind, stellt sich über die anstehenden Veränderungen hinaus, die Frage, welche digitalen Werkzeuge auf Baustellen aktuell genutzt werden bzw. wie intensiv diese bereits Einsatz finden. Aufbauend auf der These, dass sich die Digitalisierung in den meisten Bauunternehmen erst am Anfang befindet, ist mithilfe einer Online-Umfrage der aktuelle Stand zur Nutzung innovativer Technologien auf Baustellen festgehalten worden. Die Erhebung hat gezeigt, dass bisher nur wenige Betriebe innovative Technologien während der Bauausführung einsetzen.

Neben der Darstellung der zukünftig relevanten Arbeits- und Hilfsmittel liefert die vorliegende Arbeit insbesondere Erkenntnisse zum möglichen Einsatz digitaler Technologien auf Baustellen, zu maßgebenden Informatisierungsprozessen infolge BIM sowie darauf aufbauend explizite Vorgaben für Ausbildungsinhalte und mögliche Lösungsansätze für Lehrkonzepte in beruflichen Ausbildungen.

Abstract

The various changes in the construction industry caused by the effects of digitalization are increasingly influencing work processes on construction sites. In order to be able to respond to the modifications that are already taking place and, in particular, to those that will be increasingly necessary in the future, this study has recorded and analyzed the often interdependent and usual very complex relationships that intertwine during the construction of buildings.

At the beginning the current status of potential digital tools and instruments is listed. Based on a categorization of innovative technologies for construction site activities, it is discussed how new and future-oriented technologies affect the often purely manual processes. Thus, due to manifold implementations, not only changes occur in the context of detached work activities. Traditional processes are redesigned, conventional role models are changed or existing forms of communication are reorientated. In the course of the analysis, it has been identified that the BIM method in particular exerts a major influence on the existing, mostly analogous informatization processes on construction sites.

In the course of digitalization, the integration of innovative technologies also leads to an increasing number of human-machine interactions, which must always be taken into account in analyses of new types of tools and instruments, e.g. in the form of augmented reality applications or due to growing robot integrations. Especially in the construction industry, in addition to various site-specific factors, such as weather or dirt, non repetitive work activities on site must also be brought into focus. Taking into account a variety of aspects inherent to the industry, it has been shown that many processes on construction sites can not be substituted or automated.

As there are many small and medium-sized companies in the building industry, the question arises which digital tools and instruments are currently used on construction sites and how intensively they are already being used. Based on the assumption that most construction companies are using digital tools very little, an online survey was created to determine the current status of the use of innovative technologies on construction sites. The survey has shown that only a few companies have so far used innovative technologies within construction projects.

In addition to the presentation of tools and instruments that will be relevant in the future, this study provides insights about the possible use of digital technologies on construction sites, on the essential processes of informations due to BIM, and also explicit specifications for educational concepts.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungs-, Tabellen und Abkürzungsverzeichnis	III
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangslage, Problemstellung und Zielsetzung	1
1.2 Übersicht zum methodischen Vorgehen	10
1.3 Aufbau und Inhalte des Dokuments	13
2 Digitale Konzepte und Neuentwicklungen für die Bauausführung	16
2.1 Der Begriff der Digitalisierung im Bezug auf das Forschungsvorhaben . . .	16
2.2 Expansion der Digitalisierung im Bauwesen	19
2.3 Building Information Modeling in der Bauausführung	26
2.3.1 Definition und Zielsetzung von Building Information Modeling . .	26
2.3.2 Aktueller Stand zur Implementierung von BIM in Deutschland . .	32
2.3.3 Verortung von Baustellenarbeitsprozessen in BIM	34
2.4 Digitale Neuentwicklungen für die Bauausführung	37
2.4.1 Mobile Endgeräte und Wearable Computing	37
2.4.2 Computergenerierte Realitäten: Nutzung von AR auf Baustellen .	44
2.4.3 Digitale Datenerfassung: Laserscanning und Sensor-Technologien .	50
2.4.4 Auto-ID-Techniken: Kennzeichnung von Bauteilen durch RFID . .	58
2.4.5 Additive Fertigung und 3D-Beton-Druck	63
2.4.6 Baurobotik und Drohneneinsatz auf Baustellen	68
3 Auswirkungen der Digitalisierung auf Baustellenarbeitsprozesse	80
3.1 Relevante Einflüsse der Digitalisierung auf Baustellenarbeitsprozesse . . .	80
3.1.1 Veränderungen der Bauausführung infolge Digitalisierung	80
3.1.2 Vor- und Nachteile der Digitalisierung für die Bauausführung . . .	89
3.1.3 Digitalisierung in kleinen und mittelständischen Bauunternehmen .	97
3.2 Automatisierungswahrscheinlichkeiten von Baustellentätigkeiten	101
3.2.1 Einordnung und Definitionen relevanter Begriffe	101
3.2.2 Übergeordnete Substituierbarkeitsaspekte für Arbeitstätigkeiten .	104
3.2.3 Substituierbarkeitspotenziale in Deutschland	107
3.2.4 Automatisierungswahrscheinlichkeiten im Bauhandwerk	114
3.3 Soziotechnischer Wandel von Baustellen infolge Digitalisierung	122
3.3.1 Betrachtung von Baustellen als soziotechnische Systeme	122
3.3.2 Mensch-Maschine-Interaktionen auf Baustellen	124
3.3.3 Baustellen als Cyberphysische Systeme	129
3.4 Effekte der Digitalisierung auf baustellenspezifische Besonderheiten	136

4	Informatisierungs- und Kommunikationsprozesse auf Baustellen	144
4.1	Informatisierung und Wissensmanagement auf Baustellen	144
4.2	Kommunikationsvorgänge auf Baustellen	159
4.3	Übersicht zur Verwendung digitaler Technologien auf Baustellen	166
4.4	Übersicht zur Struktur des Bauwesens in Deutschland	171
5	Online-Umfrage zur Verwendung digitaler Geräte auf Baustellen	175
5.1	Methodisches Konzept zur Online-Umfrage	175
5.2	Fragebogendesign: Entwicklung der Online-Umfrage	185
5.3	Pretest-Analyse und Beschreibung der durchgeführten Umfrage	193
5.4	Auswertung und Interpretation der Online-Umfrage	196
6	Diskussion und Fazit	206
6.1	Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse	206
6.2	Übergeordnetes Fazit des Forschungsvorhabens	213
6.3	Ausblick und weiterer Forschungsbedarf	233
	Literaturverzeichnis	238
	Anhang	I
	Pretest der Online-Umfrage	I
	Anmerkungen zum Pretest	IV
	Fragebogen der Online-Umfrage	V
	Ablauf der Handwerkersuche und Kontaktaufnahme	IX
	Anschreiben zur Online-Umfrage	X
	Zusammenfassung zu den kontaktierten Unternehmen	XI
	Daten zur Online-Umfrage	XII
	Zusätzliche Angaben zur Informatisierung	XIV

Abbildungsverzeichnis

1.1	Übergeordnete Beziehungen zwischen Zielen und Werten	8
2.1	Lebenszyklus eines Bauwerks	27
2.2	Vorverlagerung von Planungs- und Entscheidungsprozessen	28
2.3	Übersicht Auto-ID-Systeme	58
3.1	Körperliche Entlastung nach Ausbildungsniveau	92
3.2	Reduzierte Anforderungen nach Ausbildungsniveau	93
3.3	Treibende Faktoren technologisch bedingter Arbeitslosigkeit	102
3.4	Substituierbarkeitspotenzial nach Berufssegmenten	109
3.5	Automatisierungswahrscheinlichkeiten verschiedener Berufssegmente . . .	110
3.6	Substituierbarkeitspotenzial nach Anforderungsniveau	111
3.7	Automatisierungspotenzial nach Tätigkeiten	112
3.8	Substituierbarkeitspotenziale nach Anforderungsniveau von Bau- und Aus- bauberufen	115
4.1	Formen von Informationen im Bauwesen	146
4.2	Vereinfachte Darstellung der Zunahme an Informationen von der Idee bis zur Fertigstellung eines Bauwerks	148
4.3	Eindruck einer Informationsflut nach Ausbildungsniveau	149
4.4	Wissensmanagement	150
4.5	Veränderung der Relevanz der Wissensmanagement-Gestaltungsfelder . .	152
4.6	Wissensmanagement und Building Information Modeling	154
4.7	Kategorien des Wissensmanagements in Bezug auf BIM	157
4.8	Gegenüberstellung traditioneller und BIM-basierter Informationsdichten .	158
4.9	Einsatz digitaler Werkzeuge im Bauwesen	169
4.10	Tätige Personen im Bauhauptgewerbe 2016	173
5.1	Konzept zur Online-Umfrage	176
5.2	Grundgesamtheit und Stichprobe im Rahmen der Online-Umfrage	183
5.3	Übersicht über die Anzahl der Beschäftigten auf Baustellen	197
5.4	Informatisierungsprozesse auf Baustellen	198
5.5	Kommunikationsprozesse während der Bauausführung	199
5.6	Verwendung digitaler Arbeits- und Hilfsmittel	200
5.7	Nutzungshäufigkeit mobiler Endgeräte auf Baustellen	201
5.8	Mögliche Anschaffungen digitaler Arbeits- und Hilfsmittel	202

Tabellenverzeichnis

3.1	Allgemeine und auf Baustellen bezogenen Beispiele von Routine- und Nicht-Routine-Tasks	116
3.2	Substituierbarkeitspotenziale nach Berufshauptgruppen und Anforderungsniveau	118
3.3	Automatisierungswahrscheinlichkeiten ausgewählter Berufe des Bauwesens	119
4.1	Handwerksunternehmen im Bauhauptgewerbe 2017	172
4.2	Maurer- und Betonbauunternehmen im Bauhauptgewerbe 2015	174
6.1	Ausbildungsinhalte des Berufsbildes <i>Maurer/-in</i> nach den Rahmenlehrplänen für die Berufsausbildung in der Bauwirtschaft	223
6.2	Ausbildungsinhalte des Berufsbildes <i>Stahlbetonbauer/-in</i> nach den Rahmenlehrplänen für die Berufsausbildung in der Bauwirtschaft	224
6.3	Ausbildungsinhalte für Baufacharbeiter/-innen infolge BIM	226

Abkürzungsverzeichnis

AIA	Auftraggeberinformationsanforderungen
AIST	Institute of Advanced Industrial Science and Technology
AR	Augmented Reality
BAP	BIM-Abwicklungsplan
BCF	BIM Collaboration Format
BIBB	Bundesinstitut für Berufsbildung
BIM	Building Information Modeling
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau u. Stadtentwicklung
BMVI	Bundesministerium für Verkehr u. digitale Infrastruktur
bsDD	Building Smart Data Dictionary
CAD	Computer Aided Design
CDE	Common Data Environment
CGI	Computer Generated Images
CPS	Cyberphysical System, Cyberphysisches System
DWG	Drawing (CAD-Datenaustauschformat)
DXF	Drawing Exchange Format
GPR	Ground Penetrating Radar
GPS	Global Positioning System
IAB	Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung
IDM	Information Delivery Manual
IFC	Industry Foundation Classes
IuK	Informations- und Kommunikationstechnologien
Lidar	Light Detection and Ranging
LOD	Level of Detail
LOI	Level of Information
MMI	Mensch-Maschine-Interaktion/-en
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MVD	Model View Definition
OCR	Optical Character Recognition
PDF	Portable Document Format
PSA	Persönliche Schutzausrüstung
TUHH	Technische Universität Hamburg
UAV	Unmanned Aerial Vehicles
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VR	Virtual Reality
ZLL	Zentrum für Lehre und Lernen

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage, Problemstellung und Zielsetzung

Die Auswirkungen der Digitalisierung auf das Bauwesen rufen vermehrt notwendige Modifikationen hervor, die zunehmend auch bei Prozessen auf Baustellen berücksichtigt werden müssen. Die wesentlichen Veränderungen beruhen dabei nicht nur allein auf den immer stärker zunehmenden Implementierungen innovativer Arbeitsmittel und Geräte bzw. den damit einhergehenden neuen und ohnehin schon vielfältigen Herausforderungen vor Ort, sie wirken sich auch auf meist traditionelle und häufig sehr komplexe Arbeitsprozesse sowie insbesondere auf die branchenspezifischen Besonderheiten des Bauwesens aus. Notwendige Anpassungen gehen daher stets mit umfangreichen und wechselseitigen Beziehungen oder sogar mit schwer lösbaren und stellenweise sehr spezifischen Herausforderungen einher. Im Rahmen möglicher Lösungsansätze ist es demnach erforderlich, maßgebliche Kernaspekte der ausschlaggebenden Veränderungen zu erfassen, sie festzuhalten und weiterführend zu untersuchen. Vielfach sind wesentliche Ansätze jedoch aufgrund der erst am Anfang stehenden Digitalisierungsprozesse auf Baustellen noch nicht bekannt und daher in den meisten Fällen auch noch nicht vollumfänglich analysierbar.

Um dennoch den bereits vorhandenen und immer wichtiger werdenden Handlungsbedarf im Hinblick auf die zunehmenden Einbindungen digitaler Arbeits- und Hilfsmittel sowie die damit zusammenhängenden potenziellen Veränderungen aufzuzeigen, wird nachfolgend anhand übergeordneter Phänomene dargestellt, welche wesentlichen Aspekte als Auslöser angesehen werden können und welche genaueren Untersuchungen durch die damit einhergehenden Modifikationen in Betracht zu ziehen sind. Aufbauend auf einer einleitenden und bereichsübergreifenden Darstellung werden ebenfalls baubrandenspezifische Gegebenheiten aufgeführt, die als Grundlage für die eigentlichen Inhalte des vorliegenden Forschungsvorhabens – und damit auch für die vier am Ende des Abschnitts verorteten Kernthesen – angesehen werden können.

Permanente und bereichsübergreifende Neuentwicklungen digitaler Technologien

In fast allen Bereichen des menschlichen Lebens werden die anstehenden Veränderungen infolge Digitalisierung in erster Linie durch die stetig zunehmenden Einbindungen technologischer Neuentwicklungen hervorgerufen. Die häufig von analogen bzw. herkömmlichen Arbeitsmitteln (z. B. Papier, Stift, Lineal, Hammer) zu unterscheidenden digitalen Geräte und Medien (z. B. Smartphones, Datenbrillen, 3D-Drucker) können diesbezüglich als die eigentlichen „Treiber der Digitalisierung“ (Glock 2018, S. 615) ange-

sehen werden (vgl. dazu auch Bullinger & Schmidt 2002, S. 45). Eine permanente Weiterentwicklung entsprechender Technologien führt im Rahmen zunehmender Einbindungen ebenfalls zu immer stärker verbreiteten und häufig bereits durch IuK-Systeme verknüpften mannigfaltigen Anwendungen.¹ Infolge weiterer Verzahnungen dieser Entwicklungen – oft in Kombination mit bisher eher analogen Arbeitsprozessen – stehen viele Kernbereiche der breitgefächerten Berufs- und Arbeitswelten durch eben diesen technologischen Wandel vor massiven Änderungen (vgl. Möller 2015, S. 7; Schulz 2015, S. 17; Rammert 2016, S. 14; Bauer 2018, S. 1; Dengler & Matthes 2018, S. 9). Durch die Nutzung verschiedener digitaler Arbeitsgeräte sind demnach diverse Herausforderungen und Probleme – insbesondere auch im Hinblick auf Kommunikationsvorgänge zwischen Menschen und Maschinen – in den Fokus zu rücken.

Signifikante Veränderungen der Berufs- und Arbeitswelt

Bereits 1963 schrieb Jean Fourastié, dass der technische Fortschritt „unaufhörlich die Art der beruflichen Tätigkeiten“ (Fourastié 1963, S. 388) verändert. Betrachtet man die aktuellen Umbrüche der Arbeitswelt infolge Digitalisierung, so werden genau diese Veränderungsprozesse in diversen Veröffentlichungen stellenweise als „fundamental“ (Brzeski & Burk 2015, S. 3) oder als „revolutionär“ (Bahlau & Klemm-Albert 2018, S. 286) bezeichnet (vgl. dazu auch Wolter et al. 2015, S. 10). Der mit der Implementierung digitaler Arbeitsmittel einhergehende aktuelle Wandel von Berufs- und Arbeitswelten wird dabei insbesondere durch drei Faktoren charakterisiert: durch *technologische Innovationen* (s. o.), durch die Zunahme leistungsfähiger *Informations- und Kommunikationstechnologien* und durch die damit verbundenen *neuen Arbeitssysteme* (vgl. Bullinger & Schmidt 2002, S. 43-44). Alle drei Aspekte erfordern eine intensive und mit vielen Faktoren verbundene Auseinandersetzung in nahezu allen Arbeits- und Berufsfeldern.² Auch wenn wissenschaftliche Analysen der jeweiligen Herausforderungen noch in ihren Anfängen stecken (vgl. Jokovic & Stockinger 2016, S. 49), ist für viele Autorinnen und Autoren unbestritten, dass die mit der fortschreitenden Digitalisierung verbundenen Kommunikations- und Informatisierungsprozesse weitreichende Auswirkungen und Veränderungen in den Berufs- und Arbeitswelten mit sich bringen werden (vgl. Dengler & Matthes 2015a, S. 6; Arnold et al. 2015, S. 23; Jokovic & Stockinger 2016, S. 49; Landmann & Heumann 2016, S. 51; Vogler-Ludwig et al. 2016, S. 11; BMBF 2017, o. S.; Kruppe et al. 2017, S. 5; Glock 2018, S. 614).

Neben diesen direkten und weitreichenden Modifikationen infolge Digitalisierung gehen ebenfalls bereichsübergreifende Intensivierungen und Verdichtungen von Arbeit einher (vgl. Arnold et al. 2015, S. 23; Rump 2018, S. 122), die im Zuge der vielfältigen und komplexen Prozesse weitere Untersuchungen, z. B. zu neu ausgerichteten Arbeitsabläufen, zu erhöhten subjektbezogenen Anforderungen und zu damit zusammenhängenden

¹Informations- und Kommunikations-Systeme bzw. Technologien (IuK) werden mit Bezug zu Baustellenarbeitsprozessen in Abschnitt 3.3 behandelt.

²Die für Baustellen relevanten Technologien werden in Abschnitt 2.4 aufgeführt. Hervorgehobene Änderungen infolge digitaler Arbeitsmittel werden in Kapitel 3 und Kapitel 4 thematisiert.

mannigfaltigen Kompetenzen und Qualifikationen für die Ausführung von Berufs- und Arbeitstätigkeiten, notwendig machen (vgl. Bullinger & Schmidt 2002, S. 36; Wolter et al., S. 63; Krabel 2017, S. 99; Scheer & Wacher 2018, S. 85). Innerhalb eines mit den verschiedenen Komponenten verbundenen „beschleunigten Strukturwandels“ (Gensicke et al. 2016, S. 11) müssen insbesondere Aspekte der Informationstechnologie (IT), der Vernetzung, der Virtualität und auch den damit zusammenhängenden Mobilitäten und Flexibilitäten von Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern stark in den Vordergrund gerückt werden (vgl. Daheim & Wintermann 2016, S. 10; Krabel 2017, S. 99; Bauer 2018, S. 13).

Über arbeitsprozessbedingte Faktoren hinaus, sind ebenfalls die intensiv mit Bildungsaspekten verknüpften Phänomene im Wandel von Arbeitswelten zu analysieren (vgl. BMBF 2017, o. S.; Kruppe et al. 2017, S. 5). So werden für die antizipierten komplexeren und auch anspruchsvolleren Tätigkeiten zukünftig insbesondere prozessbezogene kognitive Fähigkeiten immer relevanter (vgl. Krabel 2017, S. 99). Auch eigenständiges Handeln, Selbstorganisation und Abstraktionsfähigkeit spielen unabhängig von Beruf und Branche eine zunehmend größere Rolle (vgl. Wolter et al. 2015, S. 14). Der mit all diesen Änderungen einhergehende Qualifikationsbedarf stellt nicht nur im Hinblick auf die Sicherung einer Fachkräftebasis zentrale Herausforderungen im Bereich der Berufs- und Arbeitswelten dar (vgl. BIBB 2017, S. 10; Krabel 2017, S. 102), er führt durch die Implementierung der ständig weiterentwickelten Technologien, Produkte und Dienstleistungen „ihrerseits zu weitreichenden, teils disruptiven Veränderungen in nahezu allen Branchen“ (Bauer 2018, S. 2). Im Hinblick auf notwendige Inhalte in der beruflichen Bildung stellen sich somit übergeordnet Fragen nach neuen Konzepten und Wegen der Aus- und Weiterbildung. Um weiterhin über entsprechend qualifiziertes Personal zu verfügen – das auch in Zukunft neue Technologien bedienen und warten kann (vgl. Dengler et al. 2018, S. 8) – ist es demnach wichtig, sich intensiv mit der Thematik der zu vermittelnden Inhalte im Rahmen der beruflichen Aus- und Weiterbildungen auseinanderzusetzen.

Komplexe Aufgaben und Prozesse im Bauwesen

Betrachtet man Arbeitsprozesse im Bauwesen, so müssen für mögliche Einbindungen digitaler Arbeits- und Hilfsmittel innerhalb überwiegend konventioneller Abläufe besondere Rahmenbedingungen berücksichtigt werden.³ So sind bei der Errichtung von Bauwerken bspw. stets Aspekte der Witterung, der Baulegistik oder der Gewerkeschnittstellen in die häufig sehr heterogenen Abläufe einzubeziehen. Auch durch die in vielen Fällen eng angelegten Zeitpläne und dem daraus resultierenden Termin- und Kostendruck werden die ohnehin schon sehr komplexen Prozessabläufe zusätzlich verschärft (vgl. Kohlbecker 2013, S. 9; Oesterreich & Teuteberg 2016, S. 1430; Saidi et al. 2016, S. 1515; Schönbeck 2016, S. 285; Silbe 2017, S. 11).

³Aspekte der Digitalisierung in Bezug zu den Besonderheiten des Bauwesens werden in Abschnitt 3.4 behandelt.

Neben diesen bereits vorhandenen bracheninhärenten Gegebenheiten kommen durch die Digitalisierung nun weitere und bisher kaum abschätzbare Aspekte hinzu, welche die oft nicht repetitiven Vorgänge und Abläufe im Bauwesen noch umfangreicher und stellenweise auch viel komplexer machen werden. Einen großen Anteil an den bevorstehenden Veränderungen hat insbesondere die Implementierung der Methode des *Building Information Modeling (BIM)*.⁴ Mithilfe eines dreidimensionalen Gebäudemodells werden im Rahmen einer zentral ausgerichteten bzw. modellorientierten Kommunikationsform die Interaktionen aller Beteiligten nachhaltig transformiert. BIM leitet durch eine elementorientierte Betrachtungsweise einen „Paradigmenwechsel“ (Hausknecht & Liebich 2016, S. 33) bzw. einen umfassenden Wandel der bisherigen konventionellen Arbeitstechniken und Arbeitsweisen im Bauwesen ein (vgl. Borrmann et al. 2015, S. V). Neben einer damit bevorstehenden Umstellung der Arbeitsprozesse auf digitale 3D-Modelle, sind es v. a. auch neue Berufsbilder und Rollen innerhalb der Bauwirtschaft, die im Zuge der Einbindung dieser Methode angepasst werden müssen (vgl. Wieselhuber 2018, S. 3). Eine Neustrukturierung des Bauwesens stellt diesbezüglich eine große Herausforderung dar (Hafner & Berlack 2018, S. 56).

Deutliche Veränderungen ergeben sich auch für kleine und mittelständische Unternehmen der Baubranche. So kristallisiert sich trotz zunehmender Komplexität ein enormes Potenzial an Möglichkeiten nicht nur für große Baukonzerne heraus (vgl. Jokovic & Stockinger 2016, S. 49). Beispielsweise können auch kleinere Baufirmen zukünftig mithilfe neuer Informations- und Kommunikationstechnologien ihre Dienstleistungen ebenfalls zeitgemäß planen und ausführen (vgl. Berbig et al. 2003, S. 2). Auch die mit dem Rückgang von Auszubildenden im Handwerk bestehenden Probleme des bereits vorhandenen Fachkräftemangels können und sollten ebenfalls bei den Betrachtungen innerhalb eines digitalen Wandels berücksichtigt werden (vgl. BIBB 2017, S. 9; Buddenbohm 2019, S. 324).

Handlungsbedarf im Bauwesen infolge Digitalisierung

Das Bauwesen gehörte 2016 mit 2,5 Mio. Erwerbstätigen zu den stark besetzten Berufsfeldern in Deutschland (vgl. Mai & Schwahn 2017, S. 10).⁵ Bezogen auf das Bundesgebiet handelt es sich bei der Anzahl von Berufstätigen um 5,6 % der Beschäftigten. Die mit der Baubranche verknüpften Investitionen lagen im selben Jahr bei insgesamt 309 Milliarden Euro, wobei 33 % dem Bauhauptgewerbe zugerechnet werden können. Nicht nur, dass das Bauvolumen in den letzten fünf Jahren kontinuierlich angestiegen ist, auch im Hinblick auf anstehende Großprojekte ist in der Branche in den kommenden Jahren mit einer erheblichen Kapazitätsauslastung zu rechnen (vgl. BAW 2019, S. 27-28 und S. 33). Hinzu kommt, dass viele Prozesse auf Baustellen sehr arbeits- und zeitintensiv sind, z. B. das Mauern kleinformatiger Steine oder das Herstellen objektspezifischer Schalungen (vgl. Schach et al. 2017, S. 355). Auch aus ökonomischer Sicht sollte der Bauindustrie im Hinblick auf Digitalisierungsprozesse eine hohe Relevanz zugeschrieben werden.

⁴Die Methode BIM wird in Abschnitt 2.3 ausführlich behandelt.

⁵Zum Vergleich: Das Berufsfeld *Kaufmännische Büroberufe* war 2008 mit über 3 Mio. Erwerbstätigen (9,2 %) am stärksten besetzt (vgl. Tiemann et al. 2008, S. 16).

Im Hinblick auf die bereits stattfindende Digitalisierung gehört die Baubranche im Vergleich zu anderen Industriezweigen zwar zu den Nachzüglern (vgl. Oesterreich & Teuteberg 2016, S. 1440), sie steht aber – wie andere produzierende Bereiche auch – vor tiefgreifenden und nicht mehr aufzuhaltenden Veränderungen (vgl. Glock 2018, S. 621).⁶ Auch bei Effektivitätsvergleichen schneidet die Baubranche i. d. R. schlechter ab als andere produzierende Wirtschaftszweige. Neben dem häufig aufgeführten Argument einer geringen Produktivität sind es v. a. Termin- und Kostenüberschreitungen, die als Diskussions- und Verbesserungspunkte herangezogen werden (vgl. BM 2016, S. 109; Hausknecht & Liebich 2016, S. 21; Bahlau & Klemm-Albert 2018, S. 289). Oft hängen diese Probleme eng mit der Interoperabilität aller Beteiligten zusammen. Möchte das Bauwesen neben anderen Wirtschaftszweigen produktiv und profitabel bleiben, so sind es v. a. auch die vor Ort tätigen Baufachkräfte, die den einzelnen Unternehmen eine hohe Produktivität sichern (vgl. Meyser 2010, S. 69). Bisher wurden zu den Folgen der Digitalisierung jedoch noch keine expliziten Studien für das Handwerk durchgeführt (vgl. Pfeiffer & Wesling 2016, S. 31).

Im Rahmen der bereits zuvor angesprochenen Methode des Building Information Modeling wird zukünftig in allen Bereichen fachspezifisch ausgebildetes Personal benötigt.⁷ Um den digitalen Wandel im Bauwesen sinnvoll und angepasst an die vorhandenen Bedingungen vollziehen zu können (vgl. Borrmann et al. 2015, S. 565), sind in Planung und Ausführung entsprechende und hinreichende Qualifikationen und Kompetenzen der Beteiligten erforderlich (vgl. Planen Bauen 4.0 2015a, S. 10, Wieselhuber 2018, S. 29).⁸ Jedoch mangelt es – auch aufgrund der Tatsache, dass es sich um eine relativ junge Methode handelt – noch an geeignetem Personal (vgl. Hausknecht & Liebich 2016, S. 206). Durch die anstehenden Änderungen infolge BIM besteht daher großer Bedarf an zeitgemäßen und an der Methode ausgerichteten Ausbildungen (vgl. Planen Bauen 4.0 2015b, S. 18; Bernert 2016, S. 35; Hausknecht & Liebich 2016, S. 206; Fredenlund 2017, S. 72; Syben 2017, S. 20; Tautschnig et al. 2017, S. 359). Die betrifft neben der bereits stärker digitalisierten Planungsseite auch die Ausführungstätigkeiten auf Baustellen.

Da insbesondere auf Baustellen Fachkräftemangel herrscht, der Nachwuchs fehlt und das Handwerk durch diese Effekte mehr und mehr an Boden verliert (vgl. Helmrich 2010, S. 33; Oesterreich & Teuteberg 2016, S. 1429; Harten et al. 2018, S. 1; Karl 2018, o. S.; Macherey & Middendorf 2019, S. 58), sollte eine Integration von Informations- und Kommunikationstechnologien über die zuvor aufgeführte Notwendigkeit hinaus, bestenfalls auch einen positiven Einfluss auf die Leistungsfähigkeit und Attraktivität der Bauwirtschaft ausüben (vgl. Meyser 2010, S. 73), um zukünftig die bereits beschriebenen und anstehenden Herausforderungen zu meistern. Da bereits heute bspw. nur noch eine

⁶Eine stetige Zunahme digitaler Phänomene innerhalb der Bauindustrie wird in Abschnitt 2.2: *Expansion der Digitalisierung im Bauwesen* behandelt.

⁷Die Inhalte und Ziele der Methode BIM werden in Kombination mit Baustellenarbeitsprozessen in Abschnitt 2.3.1: *Definition und Zielsetzung von Building Information Modeling* dargelegt.

⁸Der mit BIM einhergehende Wandel wird auch als „Paradigmenwechsel“ (Hausknecht & Liebich 2016, S. 33) oder „Turning Point“ (Berger 2017, S. 2) bezeichnet.

geringe Anzahl an Maurerinnen und Maurern auszumachen ist (vgl. Saidi et al. 2016, S. 1500), sind zukunftsfähige Konzepte und Anpassungen zeitnah anzustreben und umzusetzen. Die Grundsteine für eine an der Digitalisierung orientierte Entwicklung im Bauwesen sollten daher nicht nur im Hinblick auf temporär ausgerichtete Aspekte, wie Innovationskraft und Wettbewerbsfähigkeit, sondern zusätzlich durch entsprechende längerfristig gestaltete und bereits in der Berufsausbildung zu vermittelnde Qualifikationen, wie Qualitätsverbesserungen oder Beschäftigungssicherheiten, gelegt werden (vgl. Syben 2010, S. 19, Hausknecht & Liebich 2016, S. 17).

Kernthesen im Rahmen der Veränderungen infolge Digitalisierung

Die Tatsache, dass sich innerhalb eines unübersichtlichen Themenfeldes meist nur komplexe Fragestellungen mit einer Reihe verschiedener Thesen aufstellen lassen, und dass sich diese Thesen wiederum nicht nur auf einzelne Fragen, sondern auf ganze Fragenkomplexe beziehen (vgl. Atteslander 2010, S. 43-45), wird im Rahmen des Forschungsvorhabens durch das Aufstellen von vier Kernthesen berücksichtigt.⁹ Die nachfolgend aufgeführten Thesen bilden im Sinne eines *Roten Fadens* die Grundlage für die weiteren Untersuchungen des Forschungsvorhabens. Sie werden in Abschnitt 6.2 im Rahmen des übergeordneten Fazits erneut aufgegriffen.

1. **Die Nutzung digitaler Arbeitsmittel auf Baustellen befindet sich aktuell noch im Anfangsstadium.**

Die erste These enthält drei grundlegende, für das Forschungsvorhaben äußerst wichtige Begriffe. Neben dem soziotechnischen System *Baustelle*, in dem zukünftig die jeweiligen *digitalen Arbeitsmittel* eingesetzt werden, gibt das Adjektiv *aktuell* durch seine indirekte Angabe einer gegenwartsnahen Verortung eine zeitliche Definition vor. Die Operationalisierung der hier aufgeführten These findet insbesondere in Kapitel 2: *Digitale Konzepte und Neuentwicklungen für die Bauausführung* und in Abschnitt 5: *Online-Umfrage zur Verwendung digitaler Geräte auf Baustellen* statt.

2. **Die Automatisierungswahrscheinlichkeiten von Baustellentätigkeiten sind aufgrund nicht repetitiver Aufgaben gering.**

Die zweite These impliziert eine auf die eigentlichen Arbeitstätigkeiten hin ausgerichtete Annahme. Insgesamt zielt die Aussage auf mögliche Substituierbarkeitspotenziale infolge immer intensiver werdender Mensch-Maschine-Interaktionen ab. Die mit diesen Veränderungen einhergehenden Aspekte werden in erster Linie in Abschnitt 3.3: *Soziotechnischer Wandel von Baustellen infolge Digitalisierung* aufgegriffen und analysiert.

⁹Die hier aufgeführten Thesen wurden während der Bearbeitung des Themas stets an aktuelle Erkenntnisse und den jeweiligen Stand des Forschungsvorhabens angepasst und fortlaufend konkretisiert (vgl. Flick 2014, S. 174).

3. **Die Informatisierungsprozesse auf Baustellen ändern sich durch die Digitalisierung grundlegend.**

Da aufgrund der vielen anstehenden Änderungen insbesondere die Prozesse der Informatisierung angepasst werden müssen, stellt die dritte These eine wichtige Kernaussage innerhalb des Forschungsvorhabens dar. Durch Anpassungen von Informationsübermittlungen sind automatisch auch Aspekte der Kommunikation und des Wissensmanagements inbegriffen. Im Rahmen einer in Zukunft neu zu betrachtenden Informatisierung auf Baustellen spielt hier insbesondere die Methode BIM eine zentrale Rolle. Die Operationalisierung der Aussage findet vordergründig in Kapitel 4: *Informatisierungs- und Kommunikationsprozesse auf Baustellen* statt.

4. **Die Einbindung digitaler Arbeitsmittel auf Baustellen findet eher langsam statt.**

Die vierte These stellt insbesondere im Vergleich zur stationären Fertigung und durch die vielen Besonderheiten, die bei der Errichtung von Baustellen vor Ort berücksichtigt werden müssen, dar, dass Implementierungen digitaler Arbeits- und Hilfsmittel auf Baustellen nur zögernd und vorerst auch nur teilweise stattfinden. Eine Operationalisierung der durch die These angedeuteten Aspekte zu Besonderheiten bei Baustellenarbeitsprozessen findet grundlegend in Abschnitt 3.4: *Effekte der Digitalisierung auf baustellenspezifische Besonderheiten* statt.

Alle vier aufgeführten Thesen – die während der Untersuchungen insbesondere durch fortlaufende Recherchearbeiten stets an aktuelle Erkenntnisse angepasst wurden – dienen ebenfalls als übergeordnete Zielsetzungen innerhalb des Forschungsvorhabens. Sie werden je nach Kontext an verschiedenen Stellen aufgegriffen und im Hinblick auf die Veränderungen auf Baustellen zusätzlich in Kapitel 6 für eine abschließende Analyse erneut thematisiert. Insbesondere die Thesen 1 und 4 werden darüber hinaus durch die in Abschnitt 5 verortete Online-Umfrage erneut aufgegriffen.

Übergeordnete Zielsetzungen im Rahmen des Forschungsvorhabens

Da der am Ende des Forschungsvorhabens zu erwartende Erkenntnisgewinn eng mit den hier aufgestellten Thesen zusammenhängt, werden nachfolgend die ebenfalls mit diesen Aspekten verbundenen übergeordneten bzw. gesellschaftlich relevanten Zielvorstellungen erläutert.

Neben einer der wesentlichen Zielsetzungen von wissenschaftlichen Untersuchungen, dem Generieren von neuem Wissen bzw. dem Erfassen bisher unbekannter Tatbestände (vgl. Atteslander 2010, S. 24), besteht das Ziel einer explorativen Untersuchung insbesondere darin, menschliche Lebensmöglichkeiten zu sichern und diese darüber hinaus ebenfalls zu verbessern (vgl. VDI 3780 2000, S. 12). Wie an der bereits dargestellten komplexen Ausgangslage des Forschungsvorhabens erkennbar, sind auch die hier aufgeführten und

mit dem Erkenntnisgewinn verknüpften Ziele ebenfalls nur durch eine klare Strukturierung konkretisierbar. Da es im Rahmen wissenschaftlicher Untersuchungen häufig nicht nur ein, sondern gleich mehrere miteinander in Beziehung stehende Ziele gibt (vgl. ebd., S. 4), wird nachfolgend mit Bezug auf die Forschungsinhalte eine analytische Strukturierung vorgenommen. Eine damit verbundene begriffliche Hierarchiebeziehung ist in Abb. 1.1 dargestellt.

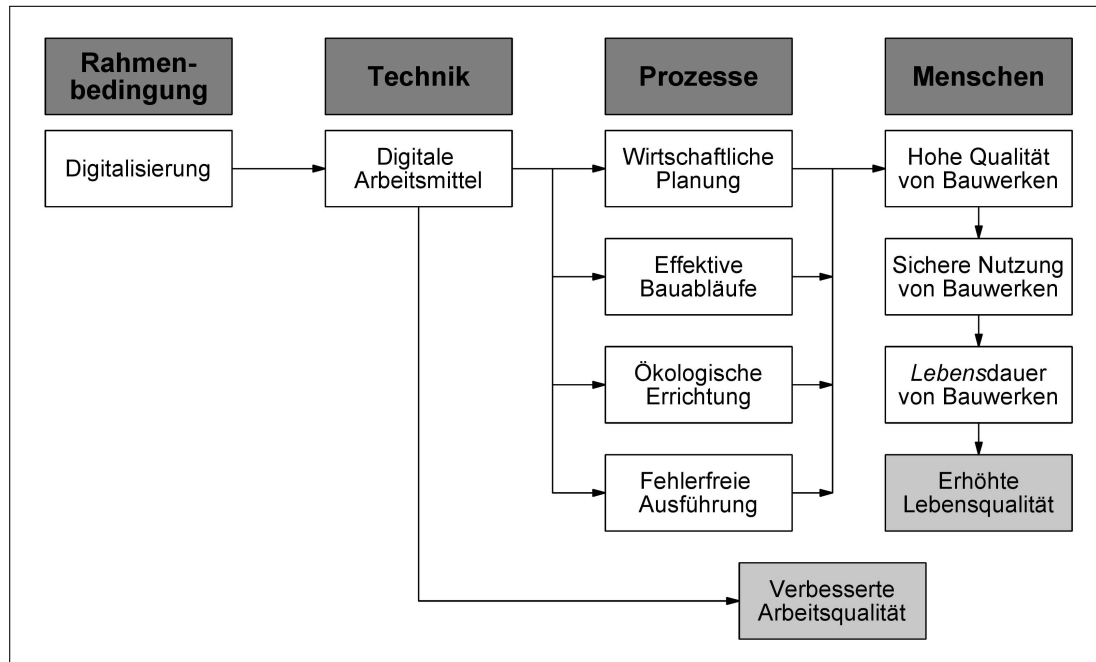


Abb. 1.1: Übergeordnete Beziehungen zwischen Zielen und Werten (eigene Darstellung in Anlehnung VDI 3780 2000, S. 7)

Bei unübersichtlichen Zielvorstellungen eines Forschungsvorhabens können – wie auch bei der Benennung von Thesen – Unterziele definiert werden, die eine klare Richtung erkennen lassen und dadurch helfen, übergeordnete Absichten besser zu erfassen (vgl. VDI 3780 2000, S. 4). Die Digitalisierung kann bei der Definition entsprechender Ziele als ausschlaggebender Impuls angesehen werden (s. Abb. 1.1).¹⁰ Innerhalb dieses Phänomens stellen die digitalen Arbeits- und Hilfsmittel die maßgeblichen Ursachen für Veränderungen verschiedenster Prozesse dar. So werden sich bspw. durch Einbindung innovativer Technologien und Methoden – im Bauwesen insbesondere infolge Building Information Modeling – nicht nur die Arbeitsprozesse an sich, sondern auch die damit verbundenen wirtschaftlichen Planungsvorgänge ändern. Dies betrifft zunehmend auch Planungsprozesse und -entscheidungen auf Baustellen. Die damit verknüpften Bauabläufe werden, wie bereits angesprochen, unter Gesichtspunkten der Effektivität im Rahmen der Digi-

¹⁰Der Begriff der Digitalisierung wird in Abschnitt 2.1 thematisiert und für weitere Betrachtungen des Forschungsvorhabens definiert.

alisierung deutliche Veränderungen erfahren. Damit einher gehen ebenfalls ökologische Faktoren, die neben der stattfindenden Technisierung – nicht nur infolge möglicher bauwerksrelevanter Datensammlungen und Informationsauswertungen, sondern auch aus gesellschaftlichem Interesse – in Zukunft stärker fokussiert werden.

Auch die Qualität der jeweiligen Bauobjekte spielt im Rahmen der Digitalisierung eine zunehmende Rolle. Da die während der Erstellung von Bauwerken stattfindenden Ausführungsfehler einen Großteil der Bauschäden ausmachen (vgl. IFB 2015, S. 35), sind Verbesserungsansätze im Hinblick auf eine fehlerfreie Ausführung anzustreben. Die in Abb. 1.1 dargestellten Aspekte der Wirtschaftlichkeit, der Effektivität, der Ökologie und der Fehlerfreiheit liefern aus einer übergeordneten gesellschaftlichen Sicht jedoch nicht nur qualitativ höherwertige Bauobjekte, sondern auch Nutzungssicherheiten und längere Lebensdauern der entsprechenden Bauwerke. Damit einher geht ebenfalls das Wohlbefinden und die daraus resultierende Lebensqualität der Nutzerinnen und Nutzer. Diese hier kurz dargestellten und insbesondere aus einem öffentlichem Interesse heraus auffassbaren Aspekte sind es, die im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens als übergeordnete Ziele angesehen werden können.

1.2 Übersicht zum methodischen Vorgehen

Die in Abschnitt 1.1 dargestellten Entwicklungen infolge Digitalisierung und die damit einhergehenden Herausforderungen und Probleme werden im Hinblick auf die erstellten Thesen durch die im vorliegenden Abschnitt beschriebenen Methoden untersucht. Neben einer intensiven Recherchearbeit bzw. *Sektoranalyse*, die als Basis des Forschungsvorhabens angesehen werden kann und sich insbesondere in Erkenntnissen aus Kapitel 2 widerspiegelt, findet sich nachfolgend ebenfalls eine Erörterung zur Forschungsmethode der in Kapitel 5 verorteten *Online-Umfrage*. Da die Darstellung aller Aspekte im Rahmen der Vorgehensweise zur Befragung jedoch sehr umfangreich ist, wird diese Methode hier nur angerissen und in Abschnitt 5.1 ausführlicher erläutert. Neben der nachfolgenden Beschreibung der beiden verwendeten Methoden wird am Ende des vorliegenden Abschnitts ebenfalls dargelegt, wie die gewonnenen Erkenntnisse im Rahmen des Forschungsvorhabens mithilfe eines Validierungskonzeptes durch Berücksichtigung der Prozess-, Kontext- und Strukturgüte sichergestellt wurden.

Sektoranalyse mit Literatur- und Online-Recherche

Um den aktuellen Stand der Digitalisierung im Bauwesen zu erfassen, wurde zu Beginn der Forschungsarbeit eine Recherche unter Zuhilfenahme verschiedener Quellen durchgeführt. Es sind im Rahmen der ebenfalls als *Sektoranalyse* zu bezeichnenden Methode in erster Linie Fachbücher, wissenschaftliche Veröffentlichungen und Aufsätze aus Fachzeitschriften herangezogen worden. Aufgrund der Aktualität des vorliegenden Themas und der Tatsache, dass es sich bei der Digitalisierung im Baubereich um ein relativ junges Forschungsgebiet handelt – und darüber hinaus kaum wissenschaftliche Publikationen zu den recherchierten Fachgebieten existieren (vgl. Oesterreich & Teuteberg 2016, S. 1432) –, wurden zudem Internet-Seiten, Newsletter und Online-Fachartikel gesichtet. Als Bestandteile der Internetrecherche können u. a. wissenschaftliche Publikationen, spezifische themenorientierte Plattformen sowie Webseiten von Herstellern und Produktanbietern genannt werden.¹¹ Neben EDV-gestützten Datenbanken, die z. B. den Zugang zu Normen und Richtlinien ermöglicht haben, sind in der Recherche stellenweise auch Flyer und Broschüren (*Graue Literatur*) einbezogen worden.

Die während der Sektoranalyse gewonnenen Erkenntnisse stellen qualitativ dar, welche Elemente und Faktoren für die Auseinandersetzung mit dem aktuellen Themengebiet nicht nur relevant sind, sondern darüber hinaus auch aller Voraussicht nach relevant bleiben. Die ausfindig gemachten Aspekte dienen somit als Ausgangslage für die weiteren wissenschaftlichen Untersuchungen im Rahmen des Forschungsvorhabens. Neben der bereits dargestellten Notwendigkeit zur generellen Bearbeitung des Themas wird im weiteren Verlauf der Arbeit aufgezeigt, dass die bereits angerissenen Herausforderungen

¹¹An dieser Stelle sei bspw. *Automation in Construction* erwähnt, die Beiträge zu digitalisierten Prozessen auf Baustellen – häufig in Kombination mit der Methode BIM – bereitstellt. Darüber hinaus wurden Internet-Plattformen wie *BIMplus* oder *BIM Today*, sowie weitere fachspezifische Datenbanken, wie etwa *RSWBplus* des Fraunhofer Instituts herangezogen.

auch branchenspezifisch innerhalb des Bauwesens eine rasant voranschreitende Entwicklung erfahren (s. Abschnitt 2.2). Zusätzlich sind in Kapitel 2 zwei weitere Recherechfelder zu finden: *Building Information Modeling* in Abschnitt 2.3 und *digitale innovative Neuentwicklungen* in Abschnitt 2.4.

Mithilfe der Sektor- bzw. Dokumentenanalyse konnten explorativ erste Entwicklungstendenzen innerhalb der betrachtenden Domäne des Bauwesens festgehalten werden (vgl. Bremer 2006, S. 594; Spöttl & Windelband 2013, S. 193). Ein entsprechender, den weiteren Untersuchungen vorangestellter Zugang dient dabei vorrangig der intensiven Auseinandersetzung mit dem Themengebiet bzw. der Ermittlung relevanter Informationen, die auf das Forschungsvorhaben schließen lassen (vgl. Bremer 2006, S. 594; Spöttl & Windelband 2013, S. 193; Petersen 2014, S. 32). So können bspw. genauere Erkenntnisse zu Sektorstrukturen, zu Beschäftigungsentwicklungen, zu Wirtschaftsdaten, zu Unternehmenszahlen oder zu Angaben des Status quo von Qualifizierungen in einem spezifischen Bereich ermittelt werden (vgl. Spöttl & Windelband 2013, S. 193). Eine ausreichend breite Basis liefert dementsprechend Erkenntnisse zu den im Forschungsvorhaben verorteten arbeitsprozessbezogenen und arbeitsorganisatorischen Aspekten, aber auch zu den bereits zuvor erwähnten gesellschaftlichen Herausforderungen.

Quantitative Online-Umfrage zum Stand der Digitalisierung auf Baustellen

Da quantitative Erhebungen nicht nur helfen, durchgeführte Sektoranalysen abzurunden (vgl. Spöttl & Windelband 2013, S. 193), sondern darüber hinaus auch einer wirklichkeitsgetreuen Abbildung der Realität für künftige Entwicklungen dienen können (vgl. Petersen 2014, S. 113 und S. 178), ist die in Kapitel 5 verortete Online-Umfrage neben dem Festhalten eines aktuellen Standes zur Verwendung digitaler Arbeits- und Hilfsmittel auf Baustellen zusätzlich auch als Grundlage für weitere Entscheidungen überaus hilfreich. Quantitative Befragungen können – bestenfalls in Kombination mit weiteren Erkenntnissen – neben der Darstellung eines Status quo v. a. auch die Datenlage zur allgemeinen Situation von Unternehmen, zu Fachkräften oder zu Qualifizierungen im Rahmen von Aus- und Weiterbildung präzisieren (vgl. Spöttl & Windelband 2013, S. 193). Im Rahmen des Forschungsvorhabens findet sich aufbauend auf der zuvor beschriebenen Sektoranalyse eine entsprechende quantitative Untersuchung durch die Online-Umfrage zur *Digitalisierung auf Baustellen* wieder. In Abschnitt 5.1: *Methodisches Konzept zur Online-Umfrage* wird die hier angerissene Vorgehensweise ausführlich erläutert.

Validierungskonzept zur Absicherung der Gültigkeit

Um die in Kapitel 6 zusammengestellten Erkenntnisse wissenschaftlich abzusichern, wird nachfolgend dargelegt, welches Konzept zur Validierung der einzelnen Vorgehensweisen während des gesamten Forschungsprozesses herangezogen wurde. Da im vorliegenden Abschnitt lediglich übergeordnete Zusammenhänge dargestellt sind, wird zudem auf die jeweiligen Abschnitte verwiesen, in denen die einzelnen Konzepte ausführlicher erläutert

werden. Für das Forschungsvorhaben sind übergeordnet drei Gütebereiche relevant. Neben der Berücksichtigung der *Struktur-* und der *Kontextgüte*, ist es im Rahmen der Untersuchungen insbesondere die *Prozessgüte*, die zur Absicherung von Erkenntnissen und Interpretationen herangezogen wurde. Alle drei Absicherungsmaßnahmen sind nachfolgend kurz beschrieben.

Prozessgüte:

Die *Prozessgüte* beschreibt die Anwendungsqualität der jeweiligen Forschungsinstrumente. Je angemessener und vollständiger dabei die gewählten Methoden im Forschungsprozess zur Anwendung kommen, desto besser ist die entsprechende Güte (vgl. Becker & Spöttl 2008, S. 205). Die Methodik zur Online-Umfrage in Kapitel 5 kann als eine solche standardisierte und zu jedem Zeitpunkt empirisch überprüfbare Methode angesehen werden. Auch wenn eine wiederholte Befragung andere Ergebnisse liefern würde, stellt die Vergleichbarkeit des standardisierten Fragebogens eine verlässliche Methode im Rahmen der Prozessgüte dar. Mit einer entsprechenden Kontrolle kann sichergestellt werden, dass die gewählte Vorgehensweise nicht nur fehlerfrei, sondern auch genau ist (vgl. Schermelleh-Engel & Werner 2012, S. 130). Im Forschungsvorhaben wird die Online-Umfrage durch einen Pretest abgesichert, der wiederum aufgrund eines vorgeordneten wissenschaftlichen Diskurses entstanden ist.

Kontextgüte:

Die *Kontextgüte* stellt sicher, dass keine wesentlichen Elemente des Forschungsgegenstandes unberücksichtigt bleiben oder sogar vergessen werden (vgl. Becker & Spöttl 2008, S. 205). Im Rahmen des Forschungsvorhabens wird eine Einbeziehungen aller relevanten Kernaspekte durch die vorangestellte Recherchearbeit erreicht. So konnte insbesondere aufgrund der umfangreichen Sektoranalyse nicht nur eine große Breite an Informationen gewonnen werden, auch die Gesamtzusammenhänge zwischen Arbeitsaufgaben, Arbeitsprozessen, Sektorstrukturen und den Anforderungen an Fachkräfte wurden hergestellt. Durch das Erfassen wesentlicher aktueller Aspekte (z. B. BIM, Substituierbarkeitspotenziale, Mensch-Maschine-Interaktionen, Informatisierung, Kommunikation) konnten zahlreiche Faktoren und Kontexte der beruflichen Wirklichkeit in die Analyse mit einbezogen werden (vgl. ebd., S. 205).

Strukturgüte:

Die *Strukturgüte* geht auf das Verhältnis zwischen Fragestellung und Forschungsdesign ein. Je genauer und passender das im Rahmen der zuvor genannten Kontextgüte zu berücksichtigende Forschungsdesign auf die Fragestellung ausgerichtet ist, desto besser ist die Strukturgüte einer wissenschaftlichen Analyse (vgl. ebd.). Ausgehend von den in Abschnitt 1.1 genannten Problemstellungen und den damit einhergehenden Thesen wird durch die intensive Auseinandersetzung mit der Thematik – und auch durch die methodischen Verknüpfungen mit den bereits dargestellten Kontexten – eine hochwertige Strukturgüte erreicht. Die Überprüfung der erstellten Kernthesen dient nicht nur ihrer Verifizierung oder Falsifizierung, sondern auch der Ergänzung der gesamten Erkenntnisse des Forschungsvorhabens (vgl. Atteslander 2010, S. 35).

1.3 Aufbau und Inhalte des Dokuments

Auch wenn bereits zuvor viele interdependente Zusammenhänge des Forschungsvorhabens angerissen wurden, sind im vorliegenden Abschnitt die einzelnen Kapitel mit den zugehörigen relevanten und spezifischen Aspekten sequenziell und in sich konsistent aufgeführt. Neben der Darstellung der Ziele innerhalb der jeweiligen Kapitel wird am Ende des vorliegenden Abschnitts zusätzlich dargelegt, welche weiteren inhaltlichen und formalen Aspekte im Rahmen des Forschungsvorhabens vorgenommen wurden. Dazu zählen bspw. die gendergerechte Schreibweise oder spezielle Hervorhebungen im Text.

Kapitel 1: Einleitung

In den beiden vorangegangenen Abschnitten des vorliegenden Kapitels wurde bereits dargestellt, warum eine Auseinandersetzung mit der behandelten Thematik relevant ist (Abschnitt 1.1), und auch, welche Vorgehensweisen für die Analyse der aufgeführten Kernthesen herangezogen wurden (Abschnitt 1.2).

Kapitel 2: Digitale Konzepte und Neuentwicklungen für die Bauausführung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden zu Beginn wesentliche, durch die Digitalisierung hervorgerufene Veränderungen anhand einer umfangreichen Sektoranalyse ermittelt. Die damit einhergehenden Erkenntnisse sind in erster Linie in Kapitel 2 vertortet. Bevor jedoch die bereits in Abschnitt 1.1 angedeuteten Modifikationen im Rahmen der Rechercharbeiten in Abschnitt 2.2 auf das Bauwesen bezogen werden, ist zuvor in Abschnitt 2.1 der verschiedenartig auffassbare Begriff der Digitalisierung in Bezug auf das Forschungsvorhaben definiert. Den eigentlichen Kern der Sektoranalyse stellen jedoch die Rechercharbeiten zu Building Information Modeling (Abschnitt 2.3) und zu den zukünftig immer relevanter werdenden innovativen digitalen Arbeitsmitteln in Abschnitt 2.4 dar. Ziel der Sektoranalyse ist es, neben dem Erstellen eines allgemeinen Überblicks über den aktuellen Stand digitaler Entwicklungen und den damit einhergehenden Beurteilungen neuer Technologien, auch eine übergeordnete theoretische und systematische Grundlage für alle weiteren Inhalte des Forschungsvorhabens zu erhalten (vgl. Atteslander 2010, S. 22).

Kapitel 3: Auswirkungen der Digitalisierung auf Baustellenarbeitsprozesse

Anknüpfend an die Sektoranalyse setzt die analytisch-prognostische Arbeit ein, bei der potenzielle Folgen identifiziert und so gut wie möglich abgeschätzt werden sollen (vgl. Ropohl 1993, S. 263). Im Hinblick auf Baustellenarbeitsprozesse finden sich diesbezüglich am Anfang des dritten Kapitels übergeordnete Änderungen infolge immer stärker zunehmender Digitalisierungsprozesse wieder (Abschnitt 3.1). Da die Einbindung technischer Innovationen auch sehr stark mit Substitutionen von Arbeitsvorgängen einhergeht, wird in Abschnitt 3.2 auf mögliche Ersetzbarkeiten von Bautätigkeiten eingegangen. Die mit der Implementierung neuer Technologien verknüpften Modifikationen im Hinblick auf verstärkte Mensch-Maschine-Interaktionen sind auf den zuvor gewonnenen

Erkenntnissen aufbauend in Abschnitt 3.3 behandelt. Kapitel 3 schließt mit einer Analyse zu den Effekten der Digitalisierung auf baustellen spezifische Besonderheiten (Abschnitt 3.4). Ziel des Kapitels ist es, die in Kapitel 2 verorteten relevanten Entwicklungen auf arbeitsprozessrelevanten Aspekte innerhalb von Baustellenumgebungen zu übertragen, sowie die dabei ineinandergreifenden und gegenseitig beeinflussenden Komponenten zu berücksichtigen, sie ins Verhältnis zu setzen und für die weiteren Betrachtungen heranzuziehen (vgl. Bullinger & Schmidt 2002, S. 42).

Kapitel 4: Informatisierungs- und Kommunikationsprozesse auf Baustellen

Kapitel 4 bindet zusätzlich zu den bereits gewonnenen Erkenntnissen zwei überaus relevante Aspekte im Hinblick auf zukünftige Baustellenarbeitsprozesse mit ein. So spielen insbesondere im Rahmen der Methode BIM neben zunehmenden *Informatisierungsprozessen* (Abschnitt 4.1) auch damit verknüpfte digital ausgerichtete *Kommunikationsvorgänge* (Abschnitt 4.2) eine immer größere Rolle. Um die auf diesen Erkenntnisgewinnen ausgerichtete Online-Umfrage in Kapitel 5 durchführen zu können, wird in Abschnitt 4.3 dargestellt, wie weit digitale Medien bisher in deutschen Betrieben verbreitet sind. Abschließend ist – ebenfalls relevant für die Online-Befragung – in Abschnitt 4.4 aufgeführt, wie viele kleine und mittelständische Bauunternehmen in der Baubranche aktuell in den Handwerksrollen eingetragen sind.

Kapitel 5: Online-Umfrage zur Verwendung digitaler Geräte auf Baustellen

Die in Kapitel 2 dargestellten technologischen Neuentwicklungen für die Bauausführung, die damit einhergehenden massiven Veränderungen (Kapitel 3) und die insbesondere durch BIM bevorstehenden Anpassungen der Informatisierungs- und Kommunikationsprozesse auf Baustellen (Abschnitte 4.1 und 4.2) werfen verschiedene Fragen nach aktuellen empirischen Daten auf. So liegen bspw. zum gegenwärtigen Stand der Digitalisierung auf Baustellen bisher keine repräsentativen Erkenntnisse vor. Ein Überblick über die Verteilung in den betreffenden Firmen stellt jedoch im Hinblick auf das Tätigen weiterer daran anknüpfender Aussagen einen großen Mehrwert dar. Anhand einer Befragung kleiner und mittelständischer Betriebe wurde diesbezüglich in Kapitel 5 der aktuelle Stand zur Verwendung digitaler Geräte auf Baustellen erhoben. Im Rahmen des dafür notwendigen Vorgehens wird zuerst in Abschnitt 5.1 das methodische Konzept für die Online-Umfrage dargelegt. Daran anschließend ist die Entwicklung des erstellten Fragebogens anhand der vorliegenden Problemstellungen und den daraus abgeleiteten Thesen aufgezeigt (Abschnitt 5.2). Mithilfe eines Pretests wurden mögliche, im Vorfeld nicht erkennbare Aspekte für die Beantwortung der einzelnen Fragen, frühzeitig berücksichtigt (Abschnitt 5.3). Nach Auswertung und Einarbeitung der Voruntersuchungen ist die Online-Befragung auf eine größere Anzahl von Bauunternehmen ausgeweitet worden. In Abschnitt 5.4 sind die gewonnenen Ergebnisse der Umfrage ausgewertet und im Hinblick auf das Gesamtkonzept des Forschungsvorhabens analysiert worden.

Kapitel 6: Diskussion und Fazit

Kapitel 6 fasst nicht nur die während des Forschungsvorhabens gewonnen Erkenntnisse zusammen (Abschnitt 6.1), sondern zeigt darüber hinaus auch auf, ob und welche Aspekte im Hinblick auf die erstellten Kernthesen berücksichtigt wurden (Abschnitt 6.2). Neben Vorschlägen für die Einbindung der Erkenntnisse in berufliche Aus- und Weiterbildungsprogramme, wird im letzten Abschnitt 6.3 ein Ausblick auf weitere potenzielle und wünschenswerte Forschungsvorhaben mit dem Schwerpunkt der Digitalisierung innerhalb von Baustellenarbeitsprozessen gegeben.

Weitere Anmerkungen zu inhaltlichen und formalen Aspekten

Das Dokument gliedert sich in Kapitel und Abschnitte. Werden Kapitel und Abschnitte über ihre Nummerierung hinaus explizit genannt, sind sie für eine bessere Lesbarkeit kursiv dargestellt (z. B. *Digitale Konzepte und Neuentwicklungen für die Bauausführung*). Je nach Betrachtungskontext gibt es innerhalb des gesamten Dokumentes stellenweise inhaltliche Überschneidungen. So werden beispielsweise Vorteile digitaler Arbeitsmittel, je nach Fokus, an verschiedenen Stellen aufgeführt.

Prinzipiell wurde auf eine geschlechtergerechte Schreibweise geachtet. So findet in der vorliegenden Arbeit nach den aktuellen Vorgaben des Duden übergeordnet die ausführliche Nennung beider Geschlechter Anwendung (vgl. Diewald & Steinhauer 2019, S. 20). An einigen Stellen wurde jedoch aus Gründen der besseren Lesbarkeit auch die ebenfalls vom Duden vorgeschlagene Variante des Schrägstrichs in Kombination mit einem Bindestrich herangezogen (z. B. *Maurer/-innen*). Diese Form ist bspw. in Tabellen oder bei Aufzählungen zu finden. Auch ist vereinzelt nur die männliche Form verwendet worden. Dies trifft insbesondere dann zu, wenn der Lesefluss durch die Berücksichtigung beider Geschlechter gestört würde, oder klar ist, dass es sich nur um maskuline Personen handelt.

Darüber hinaus ist zu erwähnen, dass bei der Nennung von Berufsbezeichnungen mit Schräg- und Bindestrich eine kursive Schriftform gewählt worden ist, damit leichter erkannt wird, dass es sich um zusammenhängende Begriffe handelt. Im Hinblick auf die Bezeichnungen *Facharbeiterin* und *Facharbeiter* ist darauf hinzuweisen, dass an einigen Stellen ebenfalls die Begriffe *Baufachhandwerkerin* und *Baufachhandwerker* verwendet wurden (vgl. Herkner 2013, S. 327). Die Begriffe Geselle oder Lehrling, so wie sie in der Handwerksordnung aufgeführt sind (vgl. Hägele 2002, S. 15), finden sich lediglich an einzelnen Stellen wieder.

2 Digitale Konzepte und Neuentwicklungen für die Bauausführung

2.1 Der Begriff der Digitalisierung im Bezug auf das Forschungsvorhaben

Um die im weiteren Verlauf des vorliegenden Kapitels maßgebenden technologischen Neuentwicklungen für die Bauausführung eindeutig verorten zu können, wird nachfolgend durch die Analyse des sehr unterschiedlich auffassbaren Begriffs der *Digitalisierung* ein für das Forschungsvorhaben übergeordneter Rahmen geschaffen. Im Hinblick auf Baustellenarbeitsprozesse wird das Phänomen der Digitalisierung für die weiteren Betrachtungen abgegrenzt und für die darauffolgende Verwendung definiert. Für die entsprechende Festlegung werden nachfolgend vier mögliche Auffassungen von Digitalisierung erörtert, bevor anschließend eine Abgrenzung, v. a. zu dem Begriff *Industrie 4.0*, stattfindet.

Diversität des Terminus *Digitalisierung*

Der Begriff *Digitalisierung* kann auf verschiedene Art und Weise interpretiert und verwendet werden. Je nach Kontext und Betrachtungsweise wird der Terminus vielfach als Schlagwort herangezogen und sogar als „Jahrhundertthema“ (Baum 2015, S. 55) bezeichnet.¹ Anhand vier verschiedener Deutungsmöglichkeiten wird der Begriff der Digitalisierung nachfolgend dargestellt und im Anschluss für das Forschungsvorhaben explizit definiert.

Umwandlung von analogen in digitale Daten:

Unter dem Begriff Digitalisierung kann u. a. eine Umwandlung analoger in digitale Daten verstanden werden (vgl. Müller 2012, S. 84; Hafner & Berlack 2018, S. 50; Ladel et al. 2018, S. VIII). Schallplatten und Tonbänder stellen als physisch notwendige Trägermedien ein – in den meisten Fällen bereits obsoletes – Beispiel eines solchen Wandels dar (vgl. Samulat 2017, S. 19).

Kumulation digitaler Geräte:

Der Begriff der Digitalisierung kann ebenfalls als Anhäufung diverser innovativer Medien, Geräte oder Werkzeuge angesehen werden. So zählen u. a. Computergenerierte Realitäten, Scanner oder Roboter zu einem gemeinsamen Technologie-Bereich (vgl. ECITB

¹Auch der ebenfalls im Rahmen des Phänomens der Digitalisierung verknüpfte Terminus der *Technisierung* ist alles andere als ein eindeutig definierter Begriff (vgl. Pfeiffer 2010, S. 232).

2019, S. 12).² Bei entsprechenden Kumulationen muss es sich jedoch nicht um physische Gegenstände handeln. Neben Daten und Informationen zählen auch übergeordnete Phänomene, wie die Automation, die Mensch-Maschine-Interaktionen oder die Künstliche Intelligenz zur Digitalisierung (vgl. Berger 2016, S. 5; ECITB 2019, S. 12).

Digital vernetzte Systeme:

Die Digitalisierung kann ebenfalls als zusammenhängendes Netzwerk aufgefasst werden (vgl. Berger 2016, S. 5). Bei entsprechenden, auf Informations- und Kommunikationstechnologien basierenden Systemen werden digitale Daten in Beziehung zueinander gesetzt (vgl. ebd., S. 3).³ Durch diese Verknüpfungen sind Maschinen, Anlagen, Produkte, Computer, Softwaresysteme und auch Menschen – häufig in Echtzeit – miteinander verbunden, so dass relevante Informationen zeitnah interpretiert, geprüft und ausgewertet werden können (vgl. Hausknecht & Liebich 2016, S. 33; Becker & Spöttl 2019, S. 80).

Auswirkungen und Effekte auf Lebens- und Arbeitswelten:

Die ersten drei aufgeführten und eher unter technischen Gesichtspunkten zu betrachtenden Interpretationen der Digitalisierung entsprechen v. a. in öffentlichen Debatten selten den umgangssprachlichen Auffassungen des mehrdeutigen Themengebietes. In vielen Publikationen, die sich mit der Digitalisierung auseinandersetzen, wird häufig von der Einbindung neuer Technologien in eher technikfremde Bereiche gesprochen (vgl. Hafner & Berlack 2018, S. 50). Durch oftmals bereichsübergreifende Implementierungen werden dabei nicht nur reine Ersetzungen von analogen zu digitalen Medien verstanden, sondern darüber hinaus auch die mannigfaltigen Effekte auf die jeweiligen Arbeitsweisen betrachtet. So gehen bspw. zusätzlich zu den in Punkt 3 beschriebenen interaktiven Vernetzungen von Menschen und Maschinen zeitgleich auch grundlegende Modifikationen der Rollenverteilungen von Nutzerinnen und Nutzern einher (vgl. Berger 2016, S. 3). Damit verbundene soziale und psychologische Aspekte sind im Rahmen anstehender Neuordnungen ebenfalls stets zu berücksichtigen.⁴ Digitalisierung meint somit die durch Einführung digitaler Arbeitsmittel hervorgerufenen Veränderungen von Arbeits- und Handlungsweisen auf einer individuellen und subjektbezogenen Ebene (vgl. Ladel et al. 2018, S. VII). Darüber hinaus müssen im Hinblick auf gewerkeübergreifende Vernetzungen von Unternehmen mit Kunden und Lieferanten auch betriebliche Vorgänge und übergeordnete Formen der Organisation stets berücksichtigt werden. Diese Aspekte spiegeln sich insbesondere im Phänomen des *Wissensmanagements* wider, dass in Unternehmen im Rahmen der Digitalisierung zunehmend an Bedeutung gewinnen wird.⁵ Auch sind bereichsübergreifende Abläufe und damit verbundene strukturelle Auswirkungen auf gesellschaftlicher Ebene stets zu berücksichtigen (vgl. Hafner & Berlack 2018, S. 50). Dies betrifft insbesondere auch Aspekte der beruflichen Bildung (vgl. Ladel et al. 2018, S. VII; Becker & Spöttl 2019, S. 80).

²Entsprechende technologische Innovationen für die Bauausführung werden im weiteren Verlauf des vorliegenden Kapitels in Abschnitt 2.4 aufgeführt.

³Auf die digitale Vernetzung wird in den Abschnitten 3.3 und 4.1 eingegangen.

⁴Phänomene zur Einbindung technologischer Innovationen werden ebenfalls in Abschnitt 3.3 behandelt.

⁵Aspekte des Wissensmanagements werden in Abschnitt 4.1 thematisiert.

Abgrenzung zu weiteren themenverwandten Begriffen

Neben Bezeichnungen wie *Internet der Dinge* (vgl. BMBF 2013, S. 10; BM 2016, S. 109; Dreher 2016, S. 71) oder dem aus der Automobilindustrie entlehnten Begriff *Lean Production* (vgl. Wolter et al. 2015, S. 11) wird insbesondere der Ausdruck *Industrie 4.0* als Synonym für Veränderungen infolge digitaler Phänomene verwendet. Dieser Begriff beschreibt in Anlehnung an die bereits zuvor stattgefundenen industriellen Revolutionen Aspekte möglicher *Cyberphysischer Systeme* (vgl. Ganschar et al. 2013, S. 6; Benner 2015, S. 91; BMAS 2015, S. 15; Dengler & Matthes 2015a, S. 6; Wolter et al. 2015, S. 11-12; Dreher 2016, S. 71; Oesterreich & Teuteberg 2016, S. 1429; Samulat 2017, S. 3). Nach Einführung der Dampfmaschine, der Erfindung des Fließbandes und der Entwicklung der elektronischen Steuerung handelt es sich bei dieser vierten Revolution insbesondere um das bereits angesprochene digital vernetzte Arbeiten.⁶ Bisher gibt es noch keine einheitliche und abgrenzungsscharfe Definition darüber, was genau unter dem Begriff Industrie 4.0 – der hauptsächlich im deutschen Sprachraum verwendet wird – zu verstehen ist (vgl. Möller 2015, S. 6; Wolter et al. 2015, S. 11; Jokovic & Stockinger 2016, S. 49; Oesterreich & Teuteberg 2016, S. 1433; Krüger 2017, S. 8; Winkelhake 2017, S. 63). Weiterhin existieren neben den bereits zuvor genannten Bezeichnungen viele weitere Abwandlungen des Begriffes. So wird u. a. auch von *Arbeit 4.0*, *Bildung 4.0*, *Berufe 4.0*, *Bauen 4.0*, *Building 4.0*, *Handwerk 4.0* oder von *Vernetzten Werkstätten* gesprochen (vgl. BM 2016, S. 109; Oesterreich & Teuteberg 2016, S. 1441; Becker & Spöttl 2019, S. 79).

Definition des Begriffes *Digitalisierung* für das Forschungsvorhaben

Um für das vorliegende Forschungsvorhaben einen Rahmen zu schaffen, in dem die Aspekte der Digitalisierung verortet werden können, wird eine Definition des hier thematisierten Begriffs vorgenommen. In vielen Veröffentlichungen decken sich die Inhalte der im vorliegenden Abschnitt diskutierten Auffassungen des Themenbereichs. So werden bspw. Mensch-Maschine-Interaktionen oder Roboter-Einbindungen sowohl unter Digitalisierung als auch unter Industrie 4.0 behandelt. Die während der Recherche ausfindig gemachten Quellen wurden diesbezüglich bereichsübergreifend gesichtet und kontextbezogen für das Forschungsvorhaben herangezogen. Da die innovativen Werkzeuge und Techniken darüber hinaus nicht nur als rein unterstützend anzusehen sind (vgl. Berger 2016, S. 3), wird die Digitalisierung wie in Punkt 4 als Auswirkung auf Arbeitsprozesse auf Baustellen angesehen. Speziell die mit einer Implementierung einhergehende Informatisierung und die wiederum damit verknüpften neuen Kommunikationsformen infolge BIM bilden Kernelemente innerhalb des als Digitalisierung aufgefassten Bereichs.

⁶Unterschiedliche Beschreibungen zur Chronologie *Industrieller Revolutionen* (häufig mit Abbildungen) können folgenden Quellen entnommen werden: Samulat (2017, S. 4); Schork et al. (2017, S. 13) Wolter et al. (2015, S. 10); Mace (2017, S. 4-5); BMAS (2015, S. 33) Frey & Osborne (2016, S. 255-258); Krüger (2017, S. 7); Wolter et al. (2015, S. 9); BMBF (2013, S. 10); Dreher (2016, S. 71); Möller (2015, S. 11); Winkelhake (2017, S. 345); Specht (2018, S. 298-299).

2.2 Expansion der Digitalisierung im Bauwesen

Anknüpfend an den im vorherigen Abschnitt 2.1 erörterten Terminus der *Digitalisierung* wird nachfolgend der rasante Anstieg neuer technologischer Entwicklungen innerhalb des Bauwesens dargelegt. Um jedoch zuvor eine Verknüpfung für die bereits in Abschnitt 1.1 aufgeführten übergeordneten Ziele zu schaffen, sind zuerst Belege in Bezug auf eine globale bzw. internationale Expansionen digitaler Arbeits- und Hilfsmittel benannt. Die Implementierung entsprechender Werkzeuge stellt im Rahmen der Digitalisierung einerseits einen stetig voranschreitenden und ubiquitären Trend dar, zeigt aber gleichzeitig auch auf, dass es v. a. für die Prozesse auf Baustellen einen erheblichen Nachholbedarf gibt. Mithilfe übergeordneter Entwicklungen wird abschließend im vorliegenden Abschnitt aufgezeigt, welche innovativen Technologien für die Errichtung von Bauwerken in Zukunft vermehrt zum Einsatz kommen werden.⁷

Globale Expansion der Digitalisierung

Eine globale Zunahme der Digitalisierung kann in vielen verschiedenen Bereichen der Lebens- und Arbeitswelten festgestellt werden. Im Hinblick auf eine immer stärker miteinander vernetzte Welt ist u. a. von einer „beständigen Ausweitung“ (Schilcher & Diekmann 2014, S. 3), einer „rasanten Entwicklung“ (Arnold et al. 2015, S. 2), von „tiefgreifenden Veränderungen“ (Jordan 2017, S. 34) oder sogar von „revolutionäre[n] Auswirkungen“ (Ganschar et al. 2013, S. 134) die Rede. Als Beispiel können die Veränderungen im Rahmen von Transport- und Mobilitätsangeboten herangezogen werden. Durch einen Vergleich des Postkutschen-Zeitalters mit den heutigen Fortbewegungsmöglichkeiten werden entsprechende Modifikationen schnell ersichtlich.⁸

Ein aktuelles und mit dem Postkutschen-Beispiel zu vergleichendes Phänomen zeigt, dass Effekte der Digitalisierung massive Einflüsse auf die Fahrzeugindustrie haben. So waren im Dezember 2011 in Deutschland 4.356 Elektrofahrzeuge angemeldet, im Juni 2017 lag dieser Wert bereits bei 99.618 Fahrzeugen (vgl. BDEW 2017, S. 1). Innerhalb von 5,5 Jahren hatte sich die Anzahl der elektronisch angetriebenen Automobile somit um das 22-fache vergrößert. Auch autonom gesteuerte Fahrzeuge werden bereits in einigen Forschungsprojekten getestet (vgl. Berger 2016, S. 12).

Ein weiterer exponentieller Charakter des heutigen Fortschritts wird darüber hinaus auch deutlich, wenn man die Verbreitungsgeschwindigkeit verschiedener Schlüsseltechnologien miteinander vergleicht: „Während das Radio 38 Jahre benötigte, um 50 Mio. Nutzer zu erreichen, brauchte der Fernseher 13 Jahre, das Internet 3 Jahre und die Plattform Facebook nur 1 Jahr“ (Glock 2018, S. 614).

⁷Beschreibungen zu den einzelnen Technologien finden sich in Abschnitt 2.4.

⁸Für einen Überblick über die geschichtliche Entwicklung von Technik siehe Pfeiffer (2010).

Auch wenn sich i. d. R. eher weiche, stellenweise nur sehr unkonkrete und auch voneinander abweichende Prognosen zur möglichen weiteren Entwicklung der Digitalisierung finden lassen, kann festgehalten werden, dass Einbindungen neuer technologischer Medien schon bereits in vielen Arbeitsbereichen stattgefunden haben (vgl. Arnold et al. 2015, S. 22).⁹ Ausgehend von einem entsprechenden vagen Status quo wird in die Zukunft schauend häufig von beschleunigten digitalen Transformationen, sowie von Automatisierungsschüben oder sogar vom Megatrend der Digitalisierung gesprochen (vgl. Berger 2016, S. 13; Bauer 2018, S. 1; Ramge 2018, S. 74). Zu den Technologie-Megatrends zählen dabei in erster Linie die Robotik, die digitale Vernetzung, der 3D-Druck, die Mensch-Maschine-Interaktionen, das Cloud Computing, die Computergenerierten Realitäten (Virtual Reality, Augmented Reality), das Internet der Dinge, Drohnen, 3D-Scanner, Wearables, die Sensortechnik, die Künstlichen Intelligenz, Big Data und die Blockchain¹⁰ (vgl. Daheim & Wintermann 2016, S. 27; BMWi 2017, S. 7; Haghsheno et al. 2019, S. 46).¹¹

Durch die Einbindung entsprechender digitaler Technologien in die Lebens- und Arbeitswelten verändern sich nicht nur die Interaktionen zwischen Menschen untereinander, sondern insbesondere auch zwischen Menschen und Maschinen. So können bereits heute sog. *Virtual Assistants* mithilfe von Sprachsteuerungen Heizungen regulieren oder das Licht dimmen (vgl. Ramge 2018, S. 53-54). Die häufig schon im privaten Gebrauch eingesetzten Technologien werden zukünftig auch vermehrt in den verschiedensten Arbeitsbereichen eingesetzt. Eine mit den jeweiligen Systemen verknüpfte Sensorik dient dabei nicht nur zur Durchführung entsprechender digitaler Prozesse, sondern hilft zudem beim Auswerten spezifischer Daten (vgl. Glock 2018, S. 616). In Verbindung mit solchen Technologie-Systemen findet die Digitalisierung branchenübergreifend auch Einzug in die Bereiche der Informationsbeschaffung, der Kommunikationen und der Kooperationen (vgl. Gensicke et al. 2016, S. 77). Bestellungen können in Zukunft bspw. digital vorgenommen bzw. nachverfolgt werden, so dass *on demand* und *just in time* produziert werden kann (vgl. Wolter et al. 2015, S. 12; Berger 2016, S. 11). Menschen arbeiten dann in intelligenten Produktionsumgebungen, in denen sie über multimodale Assistenzsysteme direkt mit Maschinen interagieren und Informationen austauschen (vgl. BMBF 2013, S. 29).¹² Noch weiter gehen die Konzepte von *Smart Factories* (Bellmann 2017a, S. 12; Schlick et al. 2018, S. 3), bei denen menschliche Arbeitskräfte immer stärker in den Hintergrund rücken und stellenweise sogar obsolet werden.¹³

⁹ Aspekte zu Prognosen und Ersetzbarkeiten in Arbeitswelten werden in Abschnitt 3.2: *Automatisierungswahrscheinlichkeiten von Baustellentätigkeiten* aufgeführt.

¹⁰ Bei der Blockchain handelt es sich vereinfacht um ein digitales Journal, in der alle Vorgänge vermerkt sind, die jemals getätigt wurden (vgl. Specht 2018, S. 214).

¹¹ Die für das Forschungsvorhaben relevanten digitalen Entwicklungen und Phänomene werden in den Abschnitten 2.3 und 2.4 behandelt.

¹² Aspekte der Mensch-Maschine-Interaktion werden in Abschnitt 3.3.2: *Mensch-Maschine-Interaktionen auf Baustellen* behandelt.

¹³ Baustellen als mögliche *Smart Factories* werden in Abschnitt 3.3.3: *Baustellen als Cyberphysische Systeme* analysiert.

Digitalisierung im Bauwesen: Nachholbedarf trotz steigender Trendprognosen

Verglichen mit anderen Nationen hat Deutschland – unabhängig von Branche oder Arbeitsgebiet – einen großen Nachholbedarf in Sachen Digitalisierung. So wurden im Jahr 2017 landesweit erst 10 % des möglichen Potenzials ausgeschöpft (vgl. Windhagen et al. 2017, S. 11). Damit liegt die Bundesrepublik weit hinter den USA, dem Vereinigten Königreich, den Niederlanden oder Schweden (vgl. ebd.). Doch trotz vorhandenem Rückstand auf internationaler Ebene hat die Digitalisierung auch hierzulande bereits in vielen Arbeitsbereichen Einzug erhalten. Dies betrifft in erster Linie Berufssparten, in denen viele routinemäßige Handlungen und Tätigkeiten anfallen.¹⁴ Ausgehend von einer bisher anfänglichen Verbreitung innovativer Technologien, v. a. in technikaffinen Bereichen, ist zukünftig mit weiteren „revolutionäre[n] Auswirkungen auf die Produktion in Deutschland“ (Ganschar et al. 2013, S.134) zu rechnen. So wird prognostiziert, dass die Digitalisierung innerhalb des *Verarbeitenden Gewerbes* von 20 % im Jahr 2015 auf 40 % im Jahr 2025 ansteigen wird (vgl. Wolter et al. 2015, S. 33). Insgesamt verspricht die Digitalisierung ein erhebliches Wachstumspotenzial für die gesamte deutsche Wirtschaft (vgl. Windhagen et al. 2017, S. 6 und S. 23). Da jedoch gerade innerhalb des Bauwesens viele branchenspezifische Besonderheiten existieren, müssen entsprechende flächendeckende Prognosen stets kritisch betrachtet und gesondert analysiert werden.¹⁵

Vergleicht man die Entwicklung der Digitalisierung im Bauwesen mit anderen produzierenden Branchen, wird häufig auf einen „großen Rückstand“ (Heintze 2017, S. 14) hingewiesen. Konfrontierend wird die Bauindustrie in diesem Zuge gerne mit der Automobil-, der Metall- oder der Elektrobranche ins Verhältnis gesetzt (vgl. Gillies 2017, S. 18; Silbe 2017, S. 11; Ramge 2018, S. 75). In meist stationären Fertigungsbetrieben existiert aufgrund einer größeren Affinität in stärker ausgeprägten digitalen Arbeitsumfeldern ein direkterer Zugang zu innovativen Geräten und Werkzeugen. Die Implementierung technologischer Neuentwicklungen im Baugewerbe hingegen wird häufig kontrastierend u. a. als konservativ, geringer entwickelt, mit großem Nachholbedarf oder noch in den Kinderschuhen steckend, dargestellt.¹⁶

¹⁴Aspekte routinierter und nicht-routinemäßiger Arbeitstätigkeiten werden in Abschnitt 3.2: *Automatisierungswahrscheinlichkeiten von Baustellentätigkeiten* behandelt.

¹⁵Gründe und Faktoren, warum insbesondere Baustellenarbeitsprozesse im Rahmen der Digitalisierung gesondert zu betrachten sind, werden in Abschnitt 3.4: *Effekte der Digitalisierung auf baustellenspezifische Besonderheiten* dargelegt.

¹⁶Entsprechende Aussagen finden sich u. a. in Helmus (2009, Vorwort); Kölzer & Ranke (2014, S. 38); Oesterreich & Teuteberg (2016, S. 1440-1443); van Renssen et al. (2016, S. 5); Gillies (2017, S. 18); Heintze (2017, S. 14); Herter & Silbe (2017a, S. 110); Schach et al. (2017, S. 363); Tautschnig et al. (2017, S. 357); Windhagen et al. (2017, S. 12); Bahlau & Klemm-Albert (2018, S. 286); Glock (2018, S. 614-615); Hafner & Berlack (2018, S. 48-50); Klemm-Albert et al. (2018, S. 191); Brehm (2019, S. 92); Hagsheno et al. (2019, S. 45).

Auch wenn computergestützte und standardisierte Fertigungsprozesse in der Bauindustrie kein neues Thema darstellen (vgl. Poppy et al. 1995, S. 100; Huhnt 2014, S. 10) und das Bauwesen stellenweise aus den Erfahrungen anderer Branchen lernen kann, sind bisher nur wenige konkrete oder umfassende digitale Konzepte entwickelt worden. Dafür gibt es verschiedene Gründe. Neben der Berücksichtigung langer Lebenszyklen der jeweiligen Bauwerke sind es insbesondere die Baustellenarbeitsprozesse, die spezielle branchenspezifische Sichtweisen erforderlich machen (vgl. Glock 2018, S. 614).¹⁷ Um nun im Rahmen der Digitalisierung neue Potenziale ausfindig zu machen, ist es wichtig relevante praxisnahe Aspekte und Faktoren zu identifizieren und genauer zu beleuchten. Denn trotz vieler komplexer Abläufe und unvorhersehbarer Ereignisse bieten sich im Zuge der Digitalisierung auch bei der Errichtung von Bauwerken enorme Entwicklungsmöglichkeiten. Entsprechende, damit verbundene mögliche Implementierungen digitaler Arbeitsmittel werden trotz branchenspezifischer Rahmenbedingungen große Auswirkungen auf die gesamte Bauindustrie haben und diese in den kommenden Jahren stark verändern und transformieren (vgl. Berger 2016, S. 14; Gillies 2017, S. 18; Highfield 2018, o. S.; Koutsogiannis 2019, o. S.; NBS 2019, S. 10; van Sante 2019, S. 2).

Festgestellt werden kann dies bereits im Rahmen von Planungsprozessen des Bauwesens. Dort bewegen sich die Entwurfs- und Konstruktionstätigkeiten immer weiter weg vom zweidimensionalen Zeichnen (vgl. Hausknecht & Liebich 2016, S. 30; Silbe 2017, S. 11; Dowd 2018, o. S.). Nachholbedarf besteht hingegen bspw. bei der Weitergabe von Stahl- und Biegelisten, die derzeit häufig noch in Papierform oder als PDF-Datei bereitgestellt werden (vgl. Junge 2018, S. A16). Auch sind viele Aspekte auf Baustellen bestenfalls nur teilweise digitalisiert. Doch trotz teilweise spezifischer Rückstände wird prognostiziert, dass zukünftige Bauwerke von einem beträchtlich höheren Anteil industriell vorgefertigter Bauteile beeinflusst sein werden (vgl. Saidi et al. 2016, S. 1494; Schreyer 2016, S. 53; Gerrard 2019, o. S.). Die bereits angesprochene Methode des Building Information Modeling (BIM)¹⁸ spielt dabei ebenfalls eine wesentliche Rolle. Da sie zukünftig zur standardisierten Arbeits- und Vorgehensweise werden soll, wird sie nicht nur an vielen Stellen in der Fachliteratur hervorgehoben,¹⁹ sondern auch in nationalen Zielen verankert. So soll bspw. in Großbritannien im Jahr 2025 bereits ein Großteil der Planungsbüros und Bauunternehmen die anstehenden Projekte mit BIM umsetzen (vgl. Koutsogiannis 2019, o. S.; RIBA 2019, S. 18). Der mit der Arbeitsmethode einhergehende große Einfluss auf die Bauindustrie wird sich dabei nicht nur auf der Planungsseite, sondern auch in Bezug auf die Arbeitsprozesse auf Baustellen bemerkbar machen (vgl. Bock & Linner 2015, S. 6; Sharif 2015, S. 54; Berger 2017, S. 6; Gerrard 2019, o. S.).

¹⁷Besonderheiten bei der Errichtung von Bauwerken werden in Abschnitt 3.4: *Effekte der Digitalisierung auf baustellen-spezifische Besonderheiten* behandelt.

¹⁸Aspekte des Building Information Modeling werden ausführlich in Abschnitt 2.3: *Building Information Modeling in der Bauausführung* behandelt.

¹⁹Entsprechende Aussagen zur zunehmenden Einbindung von BIM finden sich u. a. in Borrmann et al. (2015, S. 17); Planen Bauen 4.0 (2015a, S. 10); Schaper & Tulke (2015, S. 437); Sharif (2015, S. 54); Aust (2016, S. 51); de Groot (2016, S. 47); Prüser (2016, S. 66); Berger (2017, S. 7); Gillies (2017, S. 18); Wieselhuber (2018, S. 17-18); Fröch et al. (2019, S. 339).

Trendentwicklungen innovativer Technologien für Baustellen

Bevor in Abschnitt 2.4 die für Baustellenarbeitsprozesse relevanten digitalen Neuentwicklungen aufgeführt und erläutert werden, sind im vorliegenden Abschnitt übergeordnet Trends dargestellt, die belegen, dass ausgewählte digitale Arbeitsmittel in Zukunft auch auf Baustellen an Bedeutung zunehmen. Bereits großflächig eingesetzte mobile Endgeräte (z. B. Smartphones oder Tablets) stellen dabei erste richtungsweisende Vorboten dar. Nicht nur durch die Tatsache, dass diese Medien schon heute von den meisten Menschen bedient werden können, auch durch immer weiter entwickelte Nutzungsmöglichkeiten ist eine zunehmende Anzahl an mobilen Endgeräten und Software-Applikationen zu erwarten (vgl. Baumanns et al. 2016, S. 20; Butz & Krüger 2017, S. 196; Gillies 2017, S. 18). Die ebenfalls in den Bereich mobiler Endgeräte verortbaren *Wearables*, z. B. Datenbrillen oder Datenuhren, erfahren darüber hinaus zudem eine rasche Verbreitung (vgl. Möller 2015, S. 7; Winkelhake 2017, S. 71; Wieselhuber 2018, S. 45). Entsprechende digitale Arbeits- und Hilfsmittel werden in Abschnitt 2.4.1: *Mobile Endgeräte und Wearable Computing* behandelt.

Die mit den mobilen Endgeräten verknüpfbare und ebenfalls noch recht junge Technologie der *Computergenerierten Realitäten* lässt als starker Entwicklungstrend ebenfalls erhebliche Potenziale innerhalb verschiedenster Wirtschaftsfelder erkennen (vgl. Mehler-Bicher & Steiger 2014, S. 1 und S. 6; BMWi 2017, S. 7). Insbesondere in den letzten Jahren haben *Virtual Reality* (VR) und *Augmented Reality* (AR) einen starken Aufschwung erlebt (vgl. Hausstädtler 2010, S. 173; Butz & Krüger 2017, S. 2 und S. 223). Die ersten Unternehmen, die sich mit Augmented Reality beschäftigten, traten erstmals 1988 in Erscheinung (vgl. Peddie 2017, S. 292). Im Jahre 2010 waren es weltweit insgesamt ca. 25 Firmen und 2017 beschäftigten sich bereits 80 Firmen mit dieser Technologie (vgl. ebd.). Auch für das Bauwesen werden Computergenerierte Realitäten zukünftig eine immer größere Rolle spielen (vgl. Mehler-Bicher & Steiger 2014, S. 4 und S. 6; Berger 2017, S. 6; Butz & Krüger 2017, S. 234; McDonnell 2017, S. 88; Mace 2017, S. 7-9; Chevin 2018a, o. S.; Cohen et al. 2018, S. 6; Gerrard 2019, o. S.). In Großbritannien nutzen nach einer Umfrage aus dem Jahr 2019 sogar schon bereits 42 % der Unternehmen VR- und AR- Anwendungen (vgl. ECITB 2019, S. 4). Insbesondere die sinnvolle Verknüpfung mit einem dreidimensionalen Bauwerksinformationsmodell im Rahmen von BIM ist im Hinblick auf eine effektive und zeitgemäße Anwendung zu nennen (vgl. McGraw 2014, S. 34-35). Auch für Baustellenarbeitsprozesse bestehen bei der Herstellung diverser Bauteile zukünftig vielfältige Nutzungsmöglichkeiten von Augmented Reality (vgl. HWK Erfurt 2016, S. 1). Weitere Anwendungsgebiete zu Computergenerierten Realitäten werden in Abschnitt 2.4.2: *Computergenerierte Realitäten: Nutzung von AR auf Baustellen* betrachtet.

Bereits heute werden im Bauwesen digitale Technologien für das Erstellen von Laserscans eingesetzt. Aufnahmen vor Ort werden jedoch insbesondere im Hinblick auf zunehmende Arbeiten an Bestandsobjekten in Zukunft deutlich häufiger stattfinden. Einen ebenfalls verstärkten Einsatz stellen neben dem Laserscanning auf Baustellen auch die bereits

insbesondere für logistische Prozesse herangezogenen Auto-ID-Techniken dar. Während Laserscans vordergründig für eine stetige Baufortschrittskontrolle verwendet werden können, bieten RFID-Transponder bspw. die Möglichkeit in Echtzeit nachzuverfolgen, welche Bauelemente wo zu finden sind. Auch hier ist eine stärkere Einbindung insbesondere in Verknüpfung mit der Methode BIM zu erwarten (vgl. McGraw 2014, S. 34; Berger 2017, S. 6). Angaben zum Laserscanning und zu Auto-ID-Techniken sind in den Abschnitten 2.4.3 und 2.4.4 zu finden.

Auch der Einsatz von 3D-Druckern weitet sich im Rahmen der Digitalisierung permanent aus und wird in Zukunft für Unternehmen der gesamten Wirtschaft immer wichtiger (vgl. Möller 2015, S. 6; BMWi 2017, S. 7). So zeigt die ebenfalls als *Additive Fertigung* bezeichnete Technologie nicht nur innerhalb von stationäre Produktionen ein breites Anwendungsspektrum, sondern übt darüber hinaus auch einen großen Einfluss auf die Bauindustrie aus (vgl. Baumanns et al. 2016, S. 20; Berger 2017, S. 6; NBS 2017, S. 26; Ravencroft 2017, o. S.; Chevin 2018a, o. S.; Koutsogiannis 2018, o. S.; Gerrard 2019, o. S.; van Sante 2019, S. 3). Weltweit nehmen diesbezüglich auch die mit dem 3D-Druck einhergehenden Entwicklungs- und Forschungsaktivitäten zu (vgl. Ravencroft 2017, o. S.; Schach et al. 2017, S. 358; Mechtcherine & Nerella 2018a, S. 275; Strunge 2018, S. 84). Es ist zu erwarten, dass sich die Additive Fertigung insbesondere im Massivbau, z. B. durch extrusionsbasierte Druckverfahren, etablieren wird (vgl. HWK Erfurt 2016, S. 1; Schach et al. 2017, S. 358; Mechtcherine & Nerella 2018a, S. 281). Trotz aktuell vorhandener Hürden bietet der 3D-Druck erhebliche Potenziale für das Bauwesen. Selbst wenn autonom-hergestellte 3D-gedruckte Häuser in größeren Städten erst in den nächsten zehn Jahren möglich sein könnten (vgl. Ravencroft 2017, o. S.), gilt es, die Einflüsse dieser Technologie auch im Hinblick auf Einbindungen in traditionelle Baustellenarbeitsprozesse zu analysieren. Im vorliegenden Forschungsvorhaben werden die hier angerissenen Aspekte in Abschnitt 2.4.5: *Additive Fertigung und 3D-Beton-Druck* genauer betrachtet.

Durch neue Generationen von Robotern (z. B. mobile Leichtbauroboter, intelligente Assistenzsysteme oder *Soft Robotics*) werden viele Arbeitsprozesse zukünftig immer stärker durch Maschinen ergänzt bzw. durch diese unterstützend ausgeführt (vgl. BMBF 2013, S. 7, Möller 2015, S. 7; Jordan 2017, S. 227). Neben Pflege- und Service-Robotern werden Maschinen entwickelt, die u. a. greifen, kleben, reinigen oder schweißen können (vgl. Winkelhake 2017, S. 75; Cousins 2018a, o. S.). Auch werden Roboter in Zukunft in der Lage sein, in Bereiche vorzudringen, die für Menschen gefährlich sind oder die von diesen nicht begangen werden sollten, z. B. brennende Gebäude (vgl. BIMplus 2018a, o. S.). Trotz großer Fortschritte in der Entwicklung von Robotern in den letzten Jahren, wird es jedoch noch einige Zeit dauern, bis diese in den verschiedensten Bereichen des menschlichen Lebens voll einsatzfähig sein werden (vgl. Brzeski & Burk 2015, S. 3; Jordan 2017, S. 196). Übergeordnet kann dennoch festgehalten werden, dass Roboter flächendeckend immer zahlreicher werden und dass eine damit einhergehende interaktive Nutzung zunimmt (vgl. Jordan 2017, S. 15; Carbonero et al. 2018, S. 11; Range 2018, S. 79).

Bezogen auf die Vorgänge auf Baustellen gibt es im Hinblick auf den Einsatz von Robotern sehr widersprüchliche Aussagen. So wird neben einem beschleunigten Wachstum der Roboter-Technologien im Bauwesen (vgl. Allen 2016, S. 6) auch davon gesprochen, dass ein disruptiver Wandel durch den Einsatz von Robotern in der nächsten Zeit nicht zu erwarten ist (vgl. Frick & Tenger 2015, S. 18). Sicher festgehalten werden kann jedoch, dass Roboter für Baustellenarbeitsprozesse mittelfristig immer relevanter werden (vgl. Berger 2017, S. 6; Brehm 2019, S. 93; Gerrard 2019, o. S.; van Sante 2019, S. 3). Auch dass Häuser zukünftig von Robotern gebaut werden können ist nach Aussage einiger Fachleute nur noch eine Frage der Zeit (vgl. Frick & Tenger 2015, S. 17; Saidi et al. 2016, S. 1500). Bereits seit Jahrzehnten gibt es Forschungsaktivitäten im Bereich von Mauerwerksrobotern und dem oben bereits angesprochenen 3D-Druck (vgl. Saidi et al. 2016, S. 1500; Chevin 2017, o. S.; Glock 2018, S. 619), so dass diesbezüglich neue technologische Entwicklungen kurzfristig zu erwarten sind. Über stets weiter verbesserte autonome Baustellenfahrzeuge und intelligente Baustellenroboter hinaus, ist ebenfalls eine Zunahme von Drohnen im Bausektor zu verzeichnen (vgl. Amos 2018, o. S.; Chevin 2018b, o. S.). Anknüpfend an Forschungsaktivitäten von *Amazon*, *Google* oder der *Deutschen Post* (vgl. Brzeski & Burk 2015, S. 1), kristallisieren sich bspw. im Hinblick auf logistische Vorgänge auch Einsatzmöglichkeiten von Drohnen für Prozesse auf Baustellen heraus. In Abschnitt 2.4.6: *Baurobotik und Drohneneinsatz auf Baustellen* werden Verknüpfungen von BIM und Baurobotern während der Ausführung genauer betrachtet.

2.3 Building Information Modeling in der Bauausführung

2.3.1 Definition und Zielsetzung von Building Information Modeling

Der im vorangegangenen Abschnitt dargestellte Trend einer immer intensiveren Digitalisierung resultiert im Bauwesen in erster Linie durch die bereits erwähnte Methode des Building Information Modeling (BIM). Um die mit dieser neuen Arbeitsweise einhergehenden wesentlichen Zusammenhänge – die insbesondere auch für die weiteren Inhalte des vorliegenden Forschungsvorhabens von großer Bedeutung sind – offenzulegen, sind nachfolgend relevante Aspekte und Faktoren dargestellt. Da es sich innerhalb der Methode jedoch um sehr umfangreiche und komplexe Arbeits- und Vorgehensweisen handelt, ist diesbezüglich lediglich eine übergeordnete skizzenhafte Beschreibung gegeben. Es sind v. a. allgemeine Aspekte aufgeführt, die für ein generelles Verständnis der Methode von Bedeutung sind. Dabei wird im vorliegenden Abschnitt nicht zwischen Planung und Ausführung getrennt. Nach einer Definition der Methode sind die zwei wesentlichen Kernaspekte der Informatisierung und der Kommunikation aufgeführt, die nicht nur die neue Arbeitsweise charakterisieren, sondern darüber hinaus auch für die weiteren Betrachtungen im Hinblick auf Baustellenarbeitsprozesse herangezogen werden können. Um nachvollziehbar darzustellen, warum die hier aufgeführten Aspekte von großer Bedeutung sind, werden abschließend übergeordnete Vorteile der Methode genannt. Damit können nicht nur die bereits in Abschnitt 2.2 aufgezeigten Trends untermauert werden, auch die Begründung für die Anwendung der neuen Arbeitsweise ist dadurch indirekt gegeben.

Definition von Building Information Modeling

Neben vielen unterschiedlichen Auffassungen zur Methode BIM, ist es v. a. die Definition des *Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur* (BMVI), die in Deutschland häufig als grundlegende Interpretation herangezogen wird:

„Building Information Modeling bezeichnet eine kooperative Arbeitsmethodik, mit der auf der Grundlage digitaler Modelle eines Bauwerks die für seinen Lebenszyklus relevanten Informationen und Daten konsistent erfasst, verwaltet und in einer transparenten Kommunikation zwischen den Beteiligten ausgetauscht oder für die weitere Bearbeitung übergeben werden.“
(BMVI 2015, S. 4)²⁰

Insbesondere zwei Aspekte sollen anhand der Definition an dieser Stelle hervorgehoben werden. So sind es für die weiteren Betrachtungen im Hinblick auf Baustellenarbeitsprozesse v. a. die *Informatisierung* und die damit einhergehende *Kommunikation*, die eine übergeordnete Relevanz aufweisen. In Abb. 2.1 können diese Punkte über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks als charakterisierende Merkmale angesehen werden.

²⁰Weitere, an die vom BMVI angelehnte Definitionen von BIM sind u. a. zu finden in Borrmann et al. (2015, Kapitel 1: S. 1 bis 21); Planen Bauen 4.0 (2015b, S. 9); Hausknecht & Liebich (2016, S. 12) Tautschnig et al. (2017, S. 357); VDI (2017, S. 2).

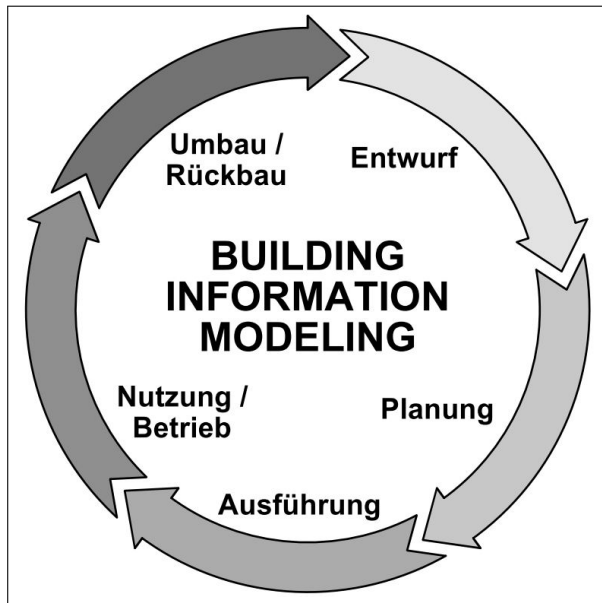


Abb. 2.1: Lebenszyklus eines Bauwerks (eigene Darstellung nach Borrmann et al. 2015, S. 4)

Die Betrachtung eines Bauobjektes vom Entwurf über die Planung, über die Ausführung bis hin zur Nutzung bzw. zum Rück- oder Umbau konstituiert im Rahmen von BIM die lückenlose Weitergabe von Informationen auf Grundlage eines dreidimensionalen Bauwerksinformationsmodells. Neben der Berücksichtigung der gesamten Lebensdauer ist ein weiterer wichtiger Aspekt von BIM, dass alle Beteiligten über diesen Zyklus vernetzt werden und idealerweise projektspezifisch an einem gemeinsamen Modell arbeiten (vgl. Planen Bauen 4.0 2015a, S. 4; Hausknecht & Liebich 2016, S. 16; BMVI 2017, S. 1; Baier & Díaz 2017, S. 30 und S. 34; Both & Wallner 2017, S. 8; Fredenlund 2017, S. 71; Silbe 2017, S. 18; Glock 2018, S. 617; Syben 2018, S. 27).

Dies schließt damit auch die Ebene der Facharbeiterinnen und Facharbeiter mit ein. Dass die Bauausführung für eine entsprechende lückenlose Anwendung der Methode eine wichtige Rolle spielt, wird im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens dargestellt. Weitere Ziele von BIM sind neben der zentralen Verankerung aller Erkenntnisse aus Planung und Ausführung an einem *Ort* (vgl. Baier & Díaz 2017, S. 32), auch die mit der Methode einhergehende digitale und i. d. R. visuelle Nutzung eines drei- bzw. stellenweise auch vier- oder fünfdimensionalen Bauwerksinformationsmodells (vgl. Borrmann et al. 2015, S. 4; Hausknecht & Liebich 2016, S. 12 Hafner & Berlack 2018, S.49). Häufig wird im Zusammenhang mit BIM auch davon gesprochen, dass zuerst virtuell geplant und dann real gebaut werden soll (vgl. Bernert 2016, S. 35; Silbe 2017, S. 14). Durch eine Vorverlegung von Planungs- und Entscheidungsprozessen – wie in Abb. 2.2 dargestellt – soll im Rahmen von BIM nicht nur eine höhere Effizienz erzielt werden, auch Fehlerminimierungen spielen im Zuge der neuen Arbeitsweise eine entscheidende Rolle (vgl. Borrmann et al. 2015, S. 1). Wie in der Abbildung ebenfalls zu erkennen ist, liegt der größte Planungsaufwand kurz vor der eigentlichen Ausführung (grau hinterlegt). Sind während der Errichtung eines Bauvorhabens Änderungen nötig, so wirkt sich das bei den meisten Bauvorhaben auf die Arbeitsprozesse auch auf Baustellen aus. Im Vergleich zur konventionellen Vorgehensweise sollen durch die Einführung der Methode BIM und einer damit einhergehenden Vorverlagerung der Planungsprozesse Änderungen in der Ausführungsphase minimiert werden.

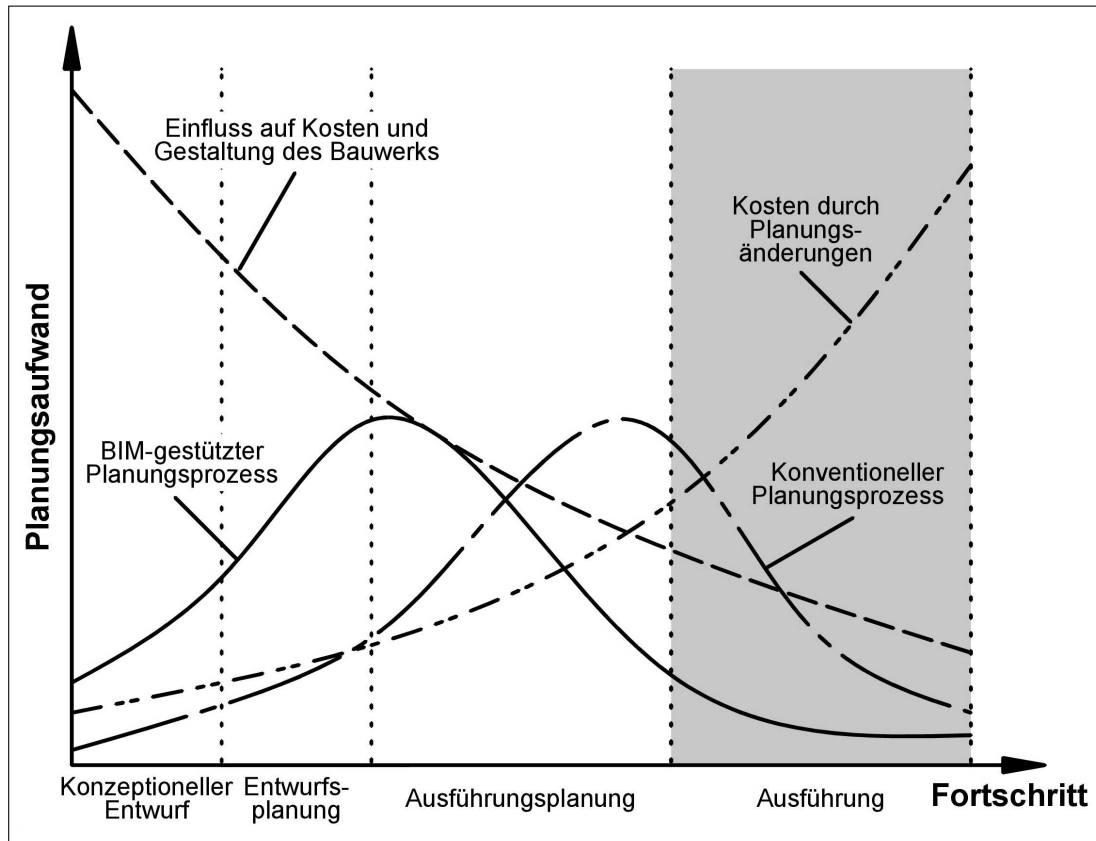


Abb. 2.2: Vorverlagerung von Planungs- und Entscheidungsprozessen (eigene Darstellung nach Borrmann et al. 2015, S. 6)

Mit der geplanten Vorverschiebung gehen im Rahmen der neuen Arbeitsmethode weitere Vorteile einher, die am Ende des vorliegenden Abschnitts aufgeführt werden. Zuvor sind zwei wesentliche Kernaspekte erläutert, die sowohl innerhalb der Planung als auch während der Ausführung von übergeordneter Bedeutung für das Verständnis der Methode sind.

Objekt-, modell- und elementorientiertes Arbeiten

Die dargestellte Arbeitsweise im Rahmen von BIM charakterisiert sich vordergründig durch ein neues Vorgehen, bei der die zu errichtenden Bauobjekte nicht mehr über zweidimensionale, sondern zukünftig anhand von 3D-Elementen geplant und ausgeführt werden (vgl. VDI 2552-2 2018, S. 6). Die während einer Planung erstellten Geometrien der Bauteile erhalten dabei neben den eigentlichen raumgebenden Abmessungen auch semantische Zusatzinformationen, wie bspw. Bauteilnummern, Materialangaben, physikalische Kennwerte (z. B. zum Brand- oder Schallschutz) oder Kostenverweise (vgl. Borrmann et al. 2015, S. 4; Hausknecht & Liebich 2016, S. 124; VDI 2552-2 2018, S. 6).

Bei den dreidimensionalen Konstruktionsprozessen ist in Zukunft ebenfalls darauf zu achten, dass unter Berücksichtigung von organisatorischen, technischen und fertigungstechnischen Abhängigkeiten eine Untergliederung der Bauwerke in einzelne Bauteile erfolgt (vgl. Berner et al. 2018, S. 262). Diese während der Planung vorgenommenen Aufteilungen in Bereiche und Elemente wirken sich unmittelbar auf die Herstellungsprozesse auf Baustellen aus, da die Bauausführenden auf eben diese geplanten Objekte zurückgreifen werden. So können Baufachhandwerkerinnen und Baufachhandwerker bei der Errichtung von Bauwerken nicht nur die notwendigen Pläne aus dem Informationsmodell ableiten (vgl. Borrmann et al. 2015, S. 5; Schreyer 2016, S. 21), sie können bei einem höheren Grad an Digitalisierung auch direkt die Bauelemente auswählen, die für die durchzuführenden Prozesse relevant sind. Damit gehen nicht nur Abmessungen und Lage der Bauteile, sondern auch weitere projektspezifische Informationen einher. Durch Verknüpfungen mit Bauteilbibliotheken ist es darüber hinaus möglich, sämtliche Eigenschaften der Objekte kontextbezogen auszuwählen (vgl. Syben 2018, S. 27). Auf Erfahrung basierende Kataloge beinhalten bereits heute vordefinierte Bauteile, wie etwa Wände, Stützen, Decken, Fenster, Türen etc. Diese Objekte kombinieren die meist parametrisierte 3D-Geometriedarstellung mit weiteren beschreibenden Merkmalen und definierten Beziehungen zu anderen Bauteilen (vgl. Borrmann et al. 2015, S. 5). Es handelt sich um Zusammenstellungen von Elementen mit zugehörigen spezifischen Attributen (vgl. VDI 2552-2 2018, S. 3), die immer häufiger auch von Seiten der Bauprodukthersteller entwickelt werden (vgl. Hausknecht & Liebich 2016, S. 15).

Interdisziplinäre Informatisierungs- und Kommunikationsprozesse

Betrachtet man die traditionellen Prozesse von Informationsweiterleitungen im Bauwesen, so handelt es sich häufig um isolierte bilaterale Kommunikationswege zwischen einzelnen Projektbeteiligten (vgl. Baier & Díaz 2017, S. 33). Während der Übergabe von Dokumenten, z. B. Statiken oder Plänen, gehen oftmals über den gesamten Lebenszyklus an vielen Stellen wichtige Informationen verloren (vgl. Borrmann et al. 2015, S. 2; Tulke & Schaper 2015, S. 420; Baier & Díaz 2017, S. 33).²¹ Durch einen offenen Austausch von Daten, Informationen, Erfahrungen und Ergebnissen sollen zukünftig im Rahmen von BIM einheitliche und interdisziplinäre Projekt-Teams gemeinsam an der Erstellung von Bauvorhaben mitwirken (vgl. Prüser 2016, S. 72; Tautschnig et al. 2017, S. 361). Die Methode dient dabei nicht nur als Kommunikationsmittel zwischen den jeweiligen Planungsbeteiligten, sondern darüber hinaus auch für den Austausch mit den Ausführenden vor Ort (vgl. Hausknecht & Liebich 2016, S.12 und S. 52; Oesterreich & Teuteberg 2016, S. 1434; Prüser 2016, S. 72; Tautschnig et al. 2017, S. 361). Durch die Konzentration aller relevanten Daten innerhalb eines Modells entsteht eine große Informationstiefe (vgl. Borrmann et al. 2015, S. 4; Hafner & Berlack 2018, S. 49), die alle Projektbeteiligten im Rahmen ihrer spezifischen Tätigkeiten nutzen sollten. Dabei ist es v. a. für Bauausführende wichtig zu wissen, wie sie an relevante Informationen gelangen und wie sie darüber hinaus auch mit anderen Projektbeteiligten kommunizieren können.

²¹ Aspekte zu Informationsverlusten innerhalb traditioneller Bauprozesse werden in Abschnitt 4.1: *Informatisierung und Wissensmanagement auf Baustellen* genauer betrachtet.

Mit dieser neuen Vorgehensweise geht eine Transparenz einher (vgl. Gasteiger 2015, S. 47; Schaper & Tulke 2015, S. 436; Hausknecht & Liebich 2016, S. 52; BIC; 2017, o. S.; BMVI 2017, S. 1), die bisher bei der Abwicklung von Bauvorhaben nur selten stattgefunden hat. Ein entsprechender Umgang mit einer solchen Offenheit ist auch im Hinblick auf Ausbildungsinhalte stets zu berücksichtigen. Weiterführende Aspekte zu Kommunikationsvorgängen auf Grundlage eines BIM-Modells werden insbesondere in Kapitel 4: *Informatisierungs- und Kommunikationsprozesse auf Baustellen* aufgegriffen.

Übergeordnete Vorteile von Building Information Modeling

Neben den bereits aufgeführten Aspekten zur Implementierung von BIM werden nachfolgend mit der Methode verbundene übergeordnete Vorteile aufgeführt. Es handelt sich dabei in erster Linie um Vorteile auf Seiten der Planung. Entsprechende positive Aspekte für die Bauausführung werden im Hinblick auf die analysierten Veränderungen von Baustellenarbeitsprozessen in Abschnitt 2.3.3: *Verortung von Baustellenarbeitsprozessen in BIM* ausführlicher dargestellt.

Mit einer Erhöhung von Kosten- und Terminalsicherheiten (vgl. Planen Bauen 4.0 2015a, S. 10; Baier & Díaz 2017, S. 34; Syben 2017, S. 20; Syben 2018, S. 8; Pilling 2019, S. 71) geht bei der Nutzung von BIM in erster Linie aus ökonomischer Sicht eine Steigerung der Effizienz und damit auch der Produktivität einher (vgl. Borrmann et al. 2015, S. V. und S. 3, Tulke & Schaper 2015, S. 422; Hausknecht & Liebich 2016, S. 12 und S. 57; BMVI 2017, S. 1; VDI 2017, S. 2; Glock 2018, S. 618; Pilling 2019, S. 71). Durch die zeitnahe Informationsbereitstellung (vgl. Schaper & Tulke 2015, S. 436; Schreyer 2016, S. 51; Tautschnig et al. 2017, S. 361; Pilling 2019, S. 71) wird neben der Reduzierung von Fehlern während der Planungs- und Ausführungsphasen (vgl. Borrmann et al. 2015, S. V und S. 3; Hausknecht & Liebich 2016, S. 12 und S. 57; Syben 2018, S. 8; Pilling 2019, S. 71) automatisch auch die Qualität der Bauwerke verbessert (vgl. Borrmann et al. 2015, S. 3; Both & Wallner 2017, S. 7; Syben 2017, S. 20; Syben 2018, S. 8; Pilling 2019, S. 71).

Weitere große Vorteile, die mit der digital ausgerichteten Arbeitsmethode einhergehen, sind die bereits angesprochenen und auf Grundlage eines zentralen Datenmodells basierenden Informatisierungsprozesse. Bei konsequenter Umsetzung einer integralen Planung sind im Rahmen von BIM nicht nur weniger Schnittstellenverluste zu erwarten (vgl. Tulke & Schaper 2015, S. 422; Glock 2018, S. 618; Pilling 2019, S. 71), auch kann mithilfe einer gemeinsamen Datenumgebung ebenfalls eine verbesserte Datenaktualität und damit gleichzeitig auch eine erhöhte Datenqualität erreicht werden (vgl. Gasteiger 2015, S. 130; Schaper & Tulke 2015, S. 436; Pilling 2019, S. 71). Darüber hinaus helfen insbesondere dreidimensionale Visualisierungen und Bauablaufsimulationen bei einer transparenteren Nachvollziehbarkeit (vgl. Gasteiger 2015, S. 47 und S. 85; Schaper & Tulke 2015, S. 436; Tulke & Schaper 2015, S. 417 und S. 422; Baier & Díaz 2017, S. 32; Berger 2017, S. 7; Hausknecht & Liebich 2016, S. 52; Pilling 2019, S. 71) oder bei den im Rahmen von BIM häufig genannten Kollisionsprüfungen (vgl. Hausknecht & Liebich 2016, S. 52; Syben 2017, S. 20; Syben 2018, S. 15; Lindemann & Syben 2019, S. 9).

Auch sind mithilfe eines aktuellen Modells stets automatische und exakte Mengenermittlungen (vgl. Gasteiger 2015, S. 70 und S. 85; Schaper & Tulke 2015, S. 436; Hausknecht & Liebich 2016, S. 52 und S. 57) oder direkte Soll-Ist-Vergleiche im Rahmen von Baustellenüberwachungen in Echtzeit möglich (vgl. Gasteiger 2015, S. 81; BMVI 2017, S. 1). Neben den bereits angesprochenen Kommunikationsverbesserungen (vgl. Gasteiger 2015, S. 47; Schaper & Tulke 2015, S. 436; Tulke & Schaper 2015, S. 422; Hausknecht & Liebich 2016, S. 57), besteht insbesondere durch die Vermeidung von Mehrfacheingaben ein weiterer wesentlicher Vorteil (vgl. Borrmann et al. 2015, S. 3; Gasteiger 2015, S. 47; Tulke & Schaper 2015, S. 422). Aber nicht nur im Hinblick auf unmittelbare projektspezifische Aspekte können Verbesserungen hervorgehoben werden. Auch sind im Rahmen von BIM transparentere Bürgerbeteiligungen durch anschaulichere Modelle möglich (vgl. Hausknecht & Liebich 2016, S. 52). Und auch das Image von Unternehmen oder sogar der ganzen Baubranche können durch die digitale Arbeitsweise angehoben und dadurch wieder attraktiver gemacht werden (vgl. ebd., S. 52 und S. 57).

2.3.2 Aktueller Stand zur Implementierung von BIM in Deutschland

Mit dem BIM-Leitfaden für Deutschland wurde 2013 erstmals von institutioneller Seite auf das aufkommende Interesse an der Methode des Building Information Modeling reagiert. Der im Auftrag des *Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung* angefertigte Forschungsbericht gibt Auskunft über Aspekte von BIM im nationalen und internationalen Kontext (vgl. BMVBS 2013). Der Leitfaden richtet sich neben Bauherr/-innen, Planer/-innen, Bauunternehmer/-innen, Bauprodukthersteller/-innen, auch an Handwerker/-innen (vgl. Egger et al. 2013, S. 9; Baier & Díaz 2017, S. 30). Obwohl das Thema BIM in Deutschland im internationalen Vergleich eher untergeordnet ist (vgl. VDI 2017, S. 2), entsteht mittlerweile in vielen Bausparten eine zunehmend stärkere Präsenz (vgl. BM 2016, S. 109). Um die Digitalisierung im Bauwesen darüber hinaus auch von politischer Seite weiter zu beschleunigen, ist auf Initiative des *Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur* (BMVI) das nationale *BIM-Kompetenzzentrum* gegründet worden (vgl. BMVI 2019, o. S.). Ziel der Bundesregierung ist es mit Hilfe eines Stufenplans nicht nur moderne IT-gestützte Methoden in der Bauwirtschaft einzuführen, sondern BIM zukünftig auch bei allen neu zu planenden Projekten flächendeckend einzusetzen (vgl. Planen Bauen 4.0 2015a, S. 13 und S. 15; Silbe 2017, S. 15). Damit folgt Deutschland einem globalen Trend, der grenzenübergreifend nicht nur diskutiert, sondern im Rahmen von Festsetzungen im Hinblick auf digitales Bauen bereits immer stärker in Erwägung gezogen wird. So sieht ein Vorstoß des Europäischen Parlaments im Zuge der Modernisierung des Vergaberechts der EU vor, künftig computergestützte Methoden wie BIM zur Vergabe von öffentlichen Bauaufträgen und Ausschreibungen einzusetzen (vgl. Borrmann et al. 2015, S. VI).

Als Vorreiter für die Auseinandersetzung mit den komplexen Prozessen und den damit verbundenen programmspezifischen Aufgaben im Rahmen von BIM kann die Initiative *buildingSMART* genannt werden (vgl. BS 2019, o. S.).²² Neben diesem international agierenden Zertifizierungs-Verein existieren bereits nationale und lokale Verbände, Ausschüsse und Gremien, die sich mit Building Information Modeling und dessen zeitnaher Einführung auseinandersetzen (vgl. BM 2016, S. 109). Als übergeordnete Institutionen können hier das *Deutsches Institut für Normung* (DIN) oder der *Verein Deutscher Ingenieure* (VDI) genannt werden (vgl. Borrmann et al. 2015, S. V). Ebenfalls auf nationaler Ebene wurde die Gesellschaft *planen-bauen 4.0* gegründet (vgl. Hausknecht & Liebich 2016, S. 19). Auch sind neben weiteren lokalen BIM-Arbeitsausschüssen oder dem bereits erwähnte BIM-Kompetenz-Zentrum der Bundesregierung (vgl. Silbe 2017, S. 14, Tautschnig et al. 2017, S. 370; BMVI 2019, o. S.), viele Universitäten auf BIM aufmerksam geworden und haben entsprechende Ausbildungsinhalte in die Lehre bzw. in Module mit eingebunden.

²²Zu den programmspezifischen Aufgaben von *buildingSMART* kann in erster Linie die Entwicklung des Datenaustauschformats *Industry Foundation Classes (IFC)* genannt werden.

Auch wenn Deutschland von einer durchgängig digitalen Prozesskette noch weit entfernt ist (vgl. Braun et al. 2015, S. 27), kann in naher Zukunft mit einer umfassenden Einführung von BIM gerechnet werden (vgl. Borrmann et al. 2015, S. V). Ein entsprechender Trend wird bereits an der anfänglichen Erstellung von Richtlinien und Normen ersichtlich. So existieren neben dem zuvor angesprochenen Leitfaden aus dem Jahr 2013 erste umfassende und detaillierte Fachbücher. Darüber hinaus sind zudem Richtlinien und Normen erstellt worden, die als Grundlagen bzw. als offizielle Dokumente herangezogen werden können. Zu nennen ist dabei u. a. die Richtlinien-Reihe des *Vereins Deutscher Ingenieure* (VDI). Seit 2017 existieren mit der VDI 2552 erste richtungsweisende und praktische Arbeitsunterlagen, die insbesondere Basiskenntnisse für die Anwendung der Methode vermitteln (vgl. VDI 2017). Neben übergeordneten Inhalten, wie bspw. begrifflichen Grundlagen, möglichen Austauschszenarien oder notwendigen Qualifikationen der Beteiligten, handelt es sich bei den Richtlinien stellenweise auch um sehr spezifische Vorgaben. So kann beispielhaft das Blatt 11.3 herangezogen werden. In dieser Richtlinie werden u. a. Informationsaustauschanforderungen für die Schalungs- und Gerüsttechnik aufgeführt. Im entsprechenden Dokument finden sich u. a. Angaben zu Fertigstellungsgraden der Planung für Schalungstechnik wieder (vgl. VDI 2552-11 2019, S. 3).

Die bereits erstellten und veröffentlichten Normen und Richtlinien helfen den Akteurinnen und Akteuren aus Planung und Ausführung bei der weiteren Einführung und Verbreitung von Building Information Modeling. Während im Jahr 2016 ca. 25 % der Unternehmen BIM regelmäßig genutzt haben (vgl. Brandt 2016, o. S.), wird nach einer Studie aus dem Jahr 2018 davon ausgegangen, dass ca. 40 % der Bauunternehmen bereits im Jahr 2021 die Methode anwenden werden (vgl. Wieselhuber 2018, S. 18). Eine flächendeckende Nutzung der digitalen Arbeitsweise, deren Durchbruch stellenweise im Jahr 2025 erwartet wird (vgl. Braun et al. 2015, S. 23), kann mithilfe einer normengerechten Grundlage auch im Hinblick auf Baustellenarbeitsprozesse nach und nach vollzogen werden.

2.3.3 Verortung von Baustellenarbeitsprozessen in BIM

Innerhalb der Methode BIM werden Vorgänge auf Baustellen häufig nur am Rande berücksichtigt. Da es sich jedoch, wie bereits dargestellt, um eine durchgängige Prozesskette beim Errichten eines Bauwerks handeln soll, werden nachfolgend Aspekte von Building Information Modeling in Kombination mit Baustellenarbeitsprozessen genauer betrachtet. Mit der Darstellung entsprechender Inhalte werden die im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens behandelten Punkte bereits einleitend aufgezeigt. Durch eine vordergründige Analyse der mit BIM einhergehenden Neuerungen sollen erste Ansätze überblickhaft dargestellt werden.²³ Abschließend werden im vorliegenden Abschnitt Vorteile der neuen Arbeitsweise genannt, die sich explizit auf die Bauausführung beziehen.

Die Bauausführung als „Schwachstelle“ im Rahmen von BIM

Wie zuvor bereits aufgeführt, wird ein Bauobjekt im Rahmen von BIM über seinen gesamten Lebenszyklus betrachtet. Schaut man sich einen durchgängigen Kreislauf, wie er in Abb. 2.1 abgebildet ist, etwas genauer an, so gehört zu einer vollständigen Abwicklung eines Bauprojektes neben den planerischen Aspekten insbesondere auch die eigentliche Herstellung der Bauwerke (vgl. Helmus 2009, S. 39). Eine lückenlose Weiterleitung von Entwurfs- oder Planungsinformationen vom Büro auf die Baustelle findet – unabhängig vom Digitalisierungsgrad – i. d. R nur in wenigen Fällen statt (vgl. Gasteiger 2015, S. 35). Normalerweise werden Aspekte der Bauausführung, wenn es um die Implementierung von BIM geht, eher „am Rande gestreift“ (Syben 2017, S. 21). In einer Umfrage auf der *BIM World* in München 2018 wurde das Handwerk sogar als Schwachstelle im Rahmen einer digitalen Umsetzung von Projekten genannt (vgl. Golinski 2019, S. 9). Um die zuvor dargestellten Vorteile, die BIM bietet, nutzen zu können, ist es daher unerlässlich, dass auch die Bauausführenden sich mit dem Thema BIM intensiv auseinandersetzen (vgl. Herre & Pfeiffer 2015, S. 527; Syben 2017, S. 20; VDI 2017, S. 2). Damit einher geht nicht nur eine formale Berücksichtigung innerhalb von Bauwerks-Lebenszyklen, sondern auch eine aktive Nutzung von 3D-Modellen durch das jeweilige Baustellenpersonal (vgl. Gasteiger 2015, S. 120; BIC 2017, o. S., Pilling 2019, S. 65). Warum eine entsprechende aktive Teilnahme von Bauausführenden – die an mehreren Datenaustausch-Szenarien beteiligt sind (vgl. Bauindustrie 2019, S. 8) – so wichtig ist, wird im folgenden Abschnitt ausführlicher dargestellt.

Modellnutzung während der Bauausführung und damit einhergehende Vorteile

Bereits vor Baubeginn kann ein Entwurfs- oder Planungsmodell von ausführenden Unternehmen für eine Aufwandsermittlung in der Ausschreibungsphase oder für eine Angebotserstellung und der damit verbundenen Mengen- und Kostenkalkulationen verwendet werden (vgl. Borrmann et al. 2015, S. 7; BM 2016, S. 109; Hausknecht & Liebich 2016, S. 14, S. 57 und S. 129; Schreyer 2016, S. 21-22; Baier & Díaz 2017, S. 33; Bauindustrie 2019, S. 5; Pilling 2019, S. 65). Das in der Planungsphase erstellte und mit

²³ Änderungen die sich im Zuge der Digitalisierung ergeben werden dazu ergänzend in Abschnitt 3.1.1 dargestellt.

allen ausführungsrelevanten Daten versehene Modell dient in erster Linie jedoch der Informationsnutzung auf Seiten der Baufachhandwerkerinnen und Baufachhandwerker vor Ort (vgl. Baier & Díaz 2017, S. 30). So können für die eigentlichen Herstellungsprozesse geometrische Angaben zu tragwerksrelevanten Bauteilen, z. B. zu Wänden, Stützen oder Balken, aus einem digitalen Rohbaumodell entnommen werden (Hausknecht & Liebich 2016, S. 124; Schreyer 2016, S. 21). Darüber hinaus sind bei komplexen Bauprojekten aber auch Konstruktionsmodelle mit erfahrungsbasierten Sonderanschlägen ausführender Firmen möglich (vgl. ebd., S. 129).

Auch für projektspezifische Baustellenabläufe vor Ort können BIM-Modelle frühzeitig im Rahmen der jeweiligen Ausführungsprozesse herangezogen werden. Durch zusätzliche bauprozessrelevante Modellierungen, z. B. von Baumaschinen oder Kränen, lassen sich insbesondere logistische Vorgänge auf Baustellen simulieren, koordinieren und stellenweise auch zeitnah optimieren (vgl. Borrmann et al. 2015, S. 7; Hausknecht & Liebich 2016, S. 129; Schreyer 2016, S. 22 und S. 33; Syben 2017, S. 20). Ein entsprechendes Baustellen-Koordinationsmodell dient damit nicht nur der Terminplanung eines Handwerksbetriebs (vgl. Hausknecht & Liebich 2016, S. 14; Bauindustrie 2019, S. 5; Pilling 2019, S. 65), sondern auch einer unternehmensübergreifenden Schnittstellenprüfung (vgl. Pilling 2019, S. 65). Darstellen lassen können sich solche zeitabhängigen Prozesse bspw. durch 3D-Viewer, die stets auf aktuelle BIM-Modelle zurückgreifen (vgl. Tulke & Schaper 2015, S. 415). Durch farbige Visualisierungen und Simulationen verschiedener Bauabläufe sind entsprechende bauleistungsrelevante Aspekte anschaulich darstellbar (vgl. Gasteiger 2015, S. 45 und S. 130; Hausknecht & Liebich 2016, S. 14; Schreyer 2016, S. 21; Baier & Díaz 2017, S. 30; Röschenkemper 2018, S. 91; Bauindustrie 2019, S. 5; Pilling 2019, S. 65). Den Baufacharbeiterinnen und Baufacharbeitern stehen dabei vor Ort mehrere Animationsmöglichkeiten zur Verfügung. So können sie bspw. Explosionsansichten, Bauablauf-Animationen, verschiedene Farb- bzw. Elementdarstellungen, direkte Objektselektierungen, Schnittebenen oder explizite Detailpunkte angezeigt bekommen (vgl. Tulke & Schaper 2015, S. 417). Neben der v. a. schon in den Planungsphasen durchführbaren Kollisionsprüfungen (vgl. Borrmann et al. 2015, S. 7; Gasteiger 2015, S. 45; Prüser 2016, S. 69; Baier & Díaz 2017, S. 30), sind es insbesondere Bauteil-Selektionen, mit denen auf Baustellen zukünftig Informationen zur Ausführung gewonnen werden können (vgl. Gasteiger 2015, S. 132; Hausknecht & Liebich 2016, S. 14; Prüser 2016, S. 69).

Neben den beschriebenen visuellen Baufortschrittskontrollen dienen 3D-Modelle auch der Datenerfassung und der Dokumentation von Arbeitsprozessen vor Ort (vgl. Gasteiger 2015, S. 89; Schaper & Tulke 2015, S. 436; Hausknecht & Liebich 2016, S. 57 und S. 129; Schreyer 2016, S. 22 und S. 43; Röschenkemper 2018, S. 91; Bauindustrie 2019, S. 5). So kann das BIM-Modell nach erbrachter Leistung für eine präzise Abrechnung oder auch für notwendige Nachkalkulationen herangezogen werden (vgl. Borrmann et al. 2015, S. 7; Gasteiger 2015, S. 89; Bauindustrie 2019, S. 5). Im Hinblick auf Baustellenabläufe sind digitale Informationsmodelle darüber hinaus auch bereichsspezifisch, z. B. für dreidimensionale Schalungskonzepte oder Bewehrungsmodelle, nutzbar (Hausknecht & Liebich 2016, S. 129; Schreyer 2016, S. 22). Betrachtet man explizit das Maurer-

und Betonbauhandwerk, so wird auch dort in Zukunft die Methode BIM an Bedeutung gewinnen (vgl. HWK Erfurt 2016, S. 1).

Durch die interdisziplinären Auswirkungen von BIM auf alle Leistungsbilder der Projektbeteiligten, sind auch Baufacharbeiterinnen und Baufacharbeiter neuen Anforderungen ausgesetzt, die bisher nicht – oder bestenfalls nur am Rande – beachtet wurden (vgl. Syben 2017, S. 21; Tautschnig et al. 2017, S. 357). Da BIM jedoch eine immer größere Rolle innerhalb der Handwerksausbildungen spielen wird (vgl. Schneider & Malkwitz 2017, o. S.), sind auch hier wesentliche Qualifikationen zu berücksichtigen. Neben dem *Wissensmanagement*, das Aspekte der hier bereits angedeuteten Informatisierung und Kommunikation beinhaltet, sind weitere übergeordnete Kenntnisse zu Prozessen und Abläufen, zur Datenverarbeitung, zur Softwarenutzung und zur Verwendung innovativer digitaler Endgeräte zu berücksichtigen (vgl. Prüser 2016, S. 69; Syben 2017, S. 20; VDI 2552-8 2019, S. 7).²⁴ Auf die in einem immer stärker vernetzten digitalen System verteilten technologischen Neuerungen, die im Rahmen der Bauausführung zukünftig stets relevanter werden, wird ausführlich im nachfolgenden Abschnitt eingegangen.

²⁴Aspekte des Wissensmanagements werden in den Abschnitten 4.1: *Informatisierung und Wissensmanagement auf Baustellen* und 4.2: *Kommunikationsvorgänge auf Baustellen* behandelt.

2.4 Digitale Neuentwicklungen für die Bauausführung

2.4.1 Mobile Endgeräte und Wearable Computing

Im vorliegenden Abschnitt werden neben herkömmlichen mobilen Endgeräten, wie Smartphones und Tablets, auch Geräte, die speziell für die Verwendung auf Baustellen herangezogen werden können, überblickhaft dargestellt. Darüber hinaus sind ebenfalls aktuelle Entwicklungen – bei denen eine Bedienung digitaler Medien nicht nur mit den Händen möglich ist – beschrieben. In erster Linie gehören zu diesen sogenannten *Wearables* Datenuhren und Datenbrillen. Aber auch Handschuhe und Exoskelette können dieser Gruppe zugeordnet werden. Durch das Tragen entsprechender Medien direkt am Körper können Facharbeiterinnen und Facharbeiter die eigentlichen handwerklichen Tätigkeiten ohne direkte Einschränkungen weiterhin mit den Händen ausführen.

Smartphones und Tablets mit branchenrelevanten Applikationen oder Programmen

Bei mobilen Endgeräten (z. B. Tablets oder Smartphones) handelt es sich um elektronische, tragbare Apparaturen, die an verschiedenen Orten und zusammen mit weiteren verknüpften Technologien vorrangig für Kommunikations- und Informatisierungsprozesse genutzt werden können (vgl. Cambridge 2018, o. S.). Es ist zu erwarten, dass diese digitalen Medien, die bereits heute in Bauunternehmen Anwendung finden, immer häufiger auch auf Baustellen zum Einsatz kommen werden (vgl. Tulke & Schaper 2015, S. 414; Fieldwire; 2018, o. S.; Herter & Silbe 2017b, S. 116).

Die meisten dieser mobilen und smarten Geräte verfügen über mehrere – auch für Baustellenaktivitäten überaus sinnvolle – Funktionalitäten.²⁵ Je nach Bedarf können Nutzerinnen und Nutzer verschiedene Anwendungsprogramme (*Apps*) unmittelbar auf Smartphones oder Tablets – bzw. auch PCs oder Notebooks – installieren (vgl. Schreyer 2016, S. 66; Winkelhake 2017, S. 341). Über eine große Auswahl an Applikationen hinaus, besitzen mobile Endgeräte ebenfalls standardmäßig integrierte Sensoren, die aufgrund ihrer technischen Sende- und Empfangsmöglichkeiten auch für die häufig wechselnden Arbeitsorte auf Baustellen von großer Bedeutung sind. Zu den Sensoren zählen u. a. satellitenbasierte oder optisch gesteuerte Ortungskomponenten, verschiedene Tracker, Lichtsensoren, Kameras oder auch Mikrophone (vgl. Butz & Krüger 2017, S. 196).²⁶ Bei vielen mobilen Endgeräten können mithilfe entsprechender Mikrophone und in Kombination mit *Virtual Assistants* bereits Sprachsteuerungen durchgeführt werden. Ein Nutzung solcher Assistenten, z. B. *Amazon Echo*, *Siri*, oder *Google Voice* (vgl. Ramge 2018, S. 53), ist auch für die Prozesse auf Baustellen überaus wahrscheinlich, da insbesondere die dort stattfindenden Tätigkeiten mit den Händen durchgeführt werden.

²⁵In Abschnitt 3.1.1: *Veränderungen der Bauausführung infolge Digitalisierung* wird auf die Nutzung von Software-Applikationen bzgl. Baustellendokumentationen eingegangen.

²⁶Tracker werden im Abschnitt 2.4.2: *Computergenerierte Realitäten: Nutzung von AR auf Baustellen* genauer betrachtet.

Über eine rein individuelle Nutzung von Smartphones und Tablets hinaus können mobile Endgeräte ebenfalls sehr gut für die häufig komplexen Geschäfts- bzw. Objektbeziehungen oder für unternehmensinterne Prozesse und Abstimmungen herangezogen werden. Bereits heute stellt das Mobiltelefon innerhalb von Baustellenvorgängen diesbezüglich ein universelles Arbeitsgerät und wichtiges Kommunikationsmittel dar (vgl. Syben 2014, S. 70 und S. 87).²⁷ Insbesondere durch soziale Netzwerke können Projektbeteiligte neben dem eigentlichen Telefonieren zusätzlich auch Kommentare, Hinweise und Notizen bidirektional oder in angelegten Gruppen verfassen und teilen. So sind spezifische Details bspw. nicht nur zwischen Bauleiter/-innen und Polier/-innen, sondern auch zwischen Baufacharbeiter/-innen und weiteren Projektbeteiligten – häufig räumlich voneinander getrennt – jederzeit abruf- und diskutierbar (vgl. ebd., S. 67).

Mit entsprechender Software können neben diesen kommunikativen Elementen aber v. a. die für die Errichtung von Bauwerken relevanten Daten vor Ort abgerufen werden. Projektspezifische Informationen, wie z. B. der Schriftverkehr oder das Dokumentenmanagement, sind dabei bereits heute in hoher Qualität und Geschwindigkeit ebenso verfügbar, wie aktuell erforderliche Angaben zum Wetterbericht oder zu weiteren expliziten Bedienungsanleitungen von Maschinen und Werkzeugen (vgl. Ganschar et al. 2013, S. 58; Tulke & Schaper 2015, S. 414; Herter & Silbe 2017a, S. 116). Neben weiteren bauseitigen Steuerungs- und Prüffunktionen sind ebenfalls die vom Baustellenpersonal einzugebenden Informationen, z. B. Fotonachweise, Arbeitsstunden oder Behinderungs- und Mängelanzeigen, über mobile Endgeräte zeitnah und lokal verortet möglich (vgl. BMBF 2013, S. 33; Syben 2014, S. 67; Herter & Silbe 2017a, S. 116).

Auch wenn mobile Endgeräte bspw. nicht für die eigentlichen Betoniervorgänge selbst herangezogen werden können, so helfen sie dennoch vorgelagerte Bestellvorgänge oder sogar die Ausführungstätigkeiten durch direkte Bestellungen bzw. durch nachgelagerte Dokumentationsprozesse zu unterstützen. Mithilfe von Software-Applikationen sind auf Grundlage eines BIM-Modells bspw. erforderliche Betonmengen ohne weitere papierbasierte Prozesse und daher ohne zusätzlichen Mehraufwand auswählbar. Bestenfalls wird im Rahmen entsprechend digitaler Vorgänge das Betonlieferwerk zeitgleich über die gewünschten Betonmengen und auch über den geplanten Betonierbeginn informiert. Darüber hinaus können Smartphones und Tablets ebenso effektiv für das Dokumentieren sämtlicher massivbaurelevanten Vorkommnisse herangezogen werden, z. B. wenn Abstandhalter nachbestellt werden müssen oder Abweichungen vom Termin- bzw. Betonierplan eintreten.

Die rauen Arbeitsbedingungen, die i. d. R. auf Baustellen vorherrschen, erschweren oder verhindern jedoch stellenweise den Einsatz handelsüblicher Smartphones oder Tablets. Für die Verwendung in Umgebungen mit viel Staub, Wärme oder Wasser, aber auch insbesondere im Hinblick auf die Gefahr von Stößen, wurden bereits digitale Geräte ent-

²⁷Wie stark diese Geräte bereits auf Baustellen genutzt werden wird in Abschnitt 4.3: *Übersicht zur Verwendung digitaler Technologien auf Baustellen* erläutert.

wickelt, die für solche speziellen Arbeitsbereiche besser geeignet sind. Hergestellt wurden bereits Produkte, die nicht nur den rauen Bedingungen vor Ort standhalten, sondern die auch über baustellenrelevante Funktionen verfügen. So kann z. B. die App *Canvas* mithilfe eines zusätzlichen Gadgets auf einem Tablet Räume scannen und die daraus entstandenen Daten mit dem BIM-Programm *Revit* verknüpfen (vgl. Canvas 2018, o. S.). Auch die Firma *Occipital* hat mit dem *Structure Sensor* einen Aufsatz entwickelt, der angebracht an einem Tablet in der Lage ist, die jeweilige Umgebung zu scannen (vgl. Structure 2018, o. S.).

Sind entsprechende Gadgets und Zubehöre nicht erhältlich oder mit den bereits gekauften Endgeräten nicht kompatibel, bieten sich Endgeräte an, die eigens für den Einsatz auf Baustellen hergestellt wurden.²⁸ So besitzt bspw. das *Smartphone CAT S61* nicht nur eine integrierte Wärmebildtechnologie, es ist auch bis 1,50 m sturzsicher und bis 5,00 m wasserdicht (vgl. Caterpillar 2018, o. S.). Aber auch übliche Standardfunktionen, wie Fotoaufnahmen und Videos sind integriert und können z. B. für Baustellendokumentationen herangezogen werden. Nicht nur für Smartphones, auch für Tablets existieren bereits Modelle, die für einen Baustelleneinsatz in Frage kommen. Beispielhaft sei hier das *FZ-M1* genannt (vgl. Panasonic 2018, o. S.). Auch dieses mobile Endgerät besitzt neben der standardmäßigen Möglichkeit zur Nutzung diverser Programme und Software-Applikationen eine Wärmebildkamera zur Erfassung, Analyse und Dokumentation von Oberflächentemperaturen.

Weniger als Ersatz, sondern mehr als Ergänzung zu den bereits dargestellten digitalen Arbeitsmitteln, dienen explizit für Baustellenarbeitsprozesse entwickelte mobile Endgeräte. So können bspw. für Lagerplatzverwaltungen Auto-ID-unterstützte Handleser, mit denen Objekte und zugehörige Identifikationsnummern gescannt bzw. eingegeben werden können, insbesondere im Rahmen von logistischen Baustellenarbeitsprozessen Anwendung finden (vgl. Helmus 2011, S. 103; Jehle et al. 2013, S. 113; Faro 2018, o. S.).²⁹

Auch die in Zukunft auf Baustellen immer häufiger durchzuführenden digitalen Aufmaße können mit speziellen, extra für diese Aufgaben entwickelten Geräten, vollzogen werden.³⁰ Ein entsprechendes Produkt stellt bspw. der *Freestyle-Scanner* des Unternehmens *FARO* dar. Dieser Handscanner wurde explizit für anspruchsvolle Scanprojekte entwickelt (vgl. Faro 2018, o. S.). Er eignet sich bspw. für Einsatzzwecke, bei denen hohe Genauigkeiten in kurzer Zeit aus verschiedenen Perspektiven erfasst werden müssen. Die während eines Scanvorgangs gewonnenen präzisen dreidimensionalen Daten können im Anschluss an die Arbeitsvorgänge vor Ort mit gängigen Softwarelösungen für Architektur, Bau- und Ingenieurwesen weiterbearbeitet werden (vgl. ebd.).

²⁸Ein Test zu baustellengeeigneten Smartphones kann bei Kellner (2018) nachgelesen werden. Beispiele können Caterpillar (2018, S. 113) und Panasonic (2018, o. S.) entnommen werden.

²⁹Auto-ID-Techniken werden in Abschnitt 2.4.4: *Auto-ID-Techniken: Kennzeichnung von Bauteilen durch RFID* behandelt.

³⁰Das Thema Scannen wird in Abschnitt 2.4.3: *Digitale Datenerfassung: Laserscanning und Sensortechnologien* behandelt.

Bei Verwendung von mobilen Endgeräten kann neben der Zeitersparnis und der Fehlerreduzierung (vgl. BM 2016, S. 109; Schreyer 2016, S. 51) insbesondere die Handhabbarkeit für die Beteiligten zu den Vorteilen gezählt werden. So können Smartphones und Tablets von den meisten Anwenderinnen und Anwendern heutzutage intuitiv verwendet werden, da sie vielen Menschen aus dem Alltag bekannt sind (vgl. Sonntag et al. 2012, S. 444). Aber auch explizit im Hinblick auf Baustellenarbeitsprozesse, die häufig an unterschiedlichen Einsatzorten stattfinden, sind die Vorteile der portablen Geräte sofort ersichtlich (vgl. Gensicke et al. 2016, S. 32). Die mobilen Anwendungen ermöglichen auf Baustellen projektbezogene Zeiterfassungen, digitale Aufmaße sowie sofort einsehbare Auftragsverwaltungen oder unmittelbare Einsatzplanungen (vgl. BM 2016, S. 109). Handschriftliche Baustellennotizen und das anschließende zusätzliche und fehlerträchtige Eingeben der Daten im Büro können bei unmittelbarer Verwendung von Smartphone- oder Tablet-Apps entfallen. Mit mobiler Hard- und Software sowie drahtlosen Kommunikationstechnologien lassen sich Informationen genau dort eingeben oder abrufen, anzeigen oder modifizieren, wo sie gerade anfallen oder benötigt werden (ebd.). Auch die zuvor bereits erwähnte Spracheingabe ist in Kombination mit mobilen Geräten für Baustellenarbeitsprozesse von großem Vorteil, da ohne Einsatz der Hände Anwendungen gestartet, gesteuert oder beendet werden können. (vgl. Butz & Krüger 2017, S. 203).

Im Hinblick auf die bereits in Abschnitt 2.3 angesprochene Methode BIM sind mobile Endgeräte für das gemeinsame Arbeiten an einem zentralen dreidimensionalen Bauwerksinformationsmodell ebenfalls von enormer Bedeutung. Die in einem BIM-Modell abgelegten Daten zur Errichtung eines Bauwerks können mithilfe der in diesem Abschnitt dargestellten mobilen Endgeräte abgerufen und als Ausführungsunterlagen herangezogen werden. Mit entsprechender BIM-fähiger Software sind somit für Baufacharbeiterinnen und Baufacharbeiter genau die Informationen verfügbar, die für die jeweiligen Arbeiten, z. B. das Herstellen von Schalungen oder das Verlegen von Bewehrungen, relevant sind.

Nachteilig ist zu erwähnen, dass mobile Endgeräte bei ungünstigen Wetterbedingungen, z. B. bei Regen, Schnee oder Sonneneinstrahlung, auf Baustellen weniger gut eingesetzt werden können. Auch die mit den entsprechenden baustellenspezifischen Rahmenbedingungen einhergehenden Aspekte – wie Staub, Feuchtigkeit oder Stoßeinwirkungen – sind für einen holistischen Einsatz eher ungünstig.³¹ Ein weiterer, aber ggf. nur temporärer Nachteil, insbesondere bei der Nutzung von Smartphones, sind die kleinen Bildschirme (vgl. Butz & Krüger 2017, S. 196). Abhilfe können diesbezüglich größere und robustere Tablets oder aber auch die im folgenden Abschnitt beschriebenen Datenbrillen schaffen.³² Mithilfe eines größeren Displays sind genauere Darstellungen und somit ebenfalls Besprechungen, z. B. von projektspezifischen Details oder anzupassenden Prozessen mit mehreren Beteiligten auch vor Ort möglich.

³¹Abschnitt 3.4: *Effekte der Digitalisierung auf baustellenspezifische Besonderheiten* behandelt spezifische Aspekte von Baustellen, die bei Verwendung digitaler Geräte berücksichtigt werden müssen.

³²Zusätzlich zur Beschreibung von Datenbrillen im vorliegenden Abschnitt wird in Abschnitt 2.4.2: *Computergenerierte Realitäten: Nutzung von AR auf Baustellen* die Nutzung von Headsets im Rahmen von Augmented Reality betrachtet.

Wearables und Exoskelette

Neben den zuvor dargestellten mobilen Endgeräten, die von Nutzerinnen und Nutzern i. d. R. in der Hand gehalten werden, existieren bereits viele Möglichkeiten einer weiteren, indirekteren Anwendung, bei der die Hände nur geringfügig bis gar nicht zur Hilfe genommen werden müssen. Nachfolgend sind vier Beispiele von tragbaren Medien dargestellt, die in Zukunft auch für Baustellenarbeitsprozesse immer relevanter werden. Betrachtet werden Datenbrillen, Datenuhren, Datenhandschuhe und sog. Exoskelette. Übergeordnet handelt es sich bei diesen Technologien um das sog. *Wearable Computing*,³³ bei dem die jeweiligen Endgeräte direkt am Körper getragen werden (vgl. Butz & Krüger 2017, S. 196; Peddie 2017, S. 22; Samulat 2017, S. 31; Winkelhake 2017, S. 71). Mit integrierten und in der Regel intuitiv und schnell nutzbaren Gestensteuerungen, Sprachassistenten oder Eye-Tracking-Verfahren (vgl. Butz & Krüger 2017, S. 196; Samulat 2017, S. 32), bieten diese mobilen Endgeräte auch für handwerkliche Arbeitsprozesse ein großes Nutzungspotenzial. Viele Anwendungen entsprechen heutzutage den gängigen Funktionen und Applikationen von Smartphones und Tablets. Darüber hinaus können die tragbaren Systeme aber nicht nur Informationen abrufen, sondern auch prozessrelevante Daten aufzeichnen (vgl. Jordan 2017, S. 292). In Kombination mit Augmented Reality werden in Abschnitt 2.4.2 weitere relevante Möglichkeiten zur Nutzung von Wearables auf Baustellen aufgegriffen.

Datenbrillen

Insbesondere für handwerkliche Tätigkeiten bieten sich Geräte an, die während der Ausführungsprozesse nicht in den Händen gehalten werden müssen und deren Informationen ohne Zusatzaufwand direkt darstellbar sind (vgl. Samulat 2017, S. 31). Für solche Fälle bieten sich u. a. Datenbrillen an. Die meisten dieser Wearables sehen heutzutage wie gängige Brillen aus. Auf ihnen ist alles, was auf mobilen Endgeräten (z. B. Smartphones oder Tablets) angezeigt werden kann, ebenfalls darstellbar (vgl. Peddie 2017, S. 36; Dengler & Matthes 2018, S. 3; Realwear 2018, o. S.). Ein entsprechendes Modell, das im Rahmen von Baustellenarbeitsprozessen zur Anwendung kommen kann, ist die Datenbrille *HMT-1* des Unternehmens *Realwear*. Dieses Modell besitzt eine sprachgesteuerte Benutzerschnittstelle, über die die Facharbeiterinnen und Facharbeiter angezeigt bekommen, welche Werkzeuge und Bauteile für die auszuführende Tätigkeit zu nutzen sind (vgl. Realwear 2018, o. S.). Die Brille kann an einem Bauhelm befestigt werden. Als Nachteil von Datenbrillen kann aufgeführt werden, dass diese bisher noch keine lange Akkulaufzeit aufweisen. Für längere Einsätze existieren jedoch kleine Ladevorrichtungen, die mit den Brillen verbunden werden können. Diese Boxen müssen dann bspw. am Gürtel befestigt oder in der Hosentasche mitgetragen werden (vgl. Peddie 2017, S. 36). Wichtig zu erwähnen ist, dass Datenbrillen keine Augmented Reality-Headsets darstellen. Sie weisen für den Einsatz auf Baustellen im Vergleich zu AR-Brillen eine eher untergeordnete Bedeutung auf.³⁴

³³In der Literatur kommen stellenweise auch andere Bezeichnungen vor: *Augmented Reality Wearables* (vgl. Mace 2017, S. 7), *Wearable Devices* oder einfach nur *Wearables* (vgl. Winkelhake 2017, S. 71).

³⁴Die AR-Technologie wird in Abschnitt 2.4.2 genauer betrachtet.

Datenuhren

Eine weitere praktische Möglichkeit, digitale Arbeitsmittel im Rahmen von Baustellenarbeitsprozessen einzubinden, ergibt sich durch die Nutzung von Datenuhren. Diese sog. *Smartwatches*, die sich seit einigen Jahren am Markt befinden, sind für den Einsatz im Alltag ausreichend robust und qualitativ hochwertig (vgl. Becker 2017, S. 146; Bernaerts et al. 2014, S. 42). Wie bei den zuvor beschriebenen mobilen Endgeräten können auch für Smartwatches diverse Software-Applikationen im Rahmen von Arbeitstätigkeiten auf Baustellen genutzt werden. Neben dem Abrufen von Informationen oder dem Aufnehmen von Sprachnotizen, sind es z. B. vordefinierte Armbewegungen, die insbesondere in vernetzten Systemen unterstützend herangezogen werden können. So ist es bspw. möglich, dass Facharbeiterinnen und Facharbeiter mit einer Bewegung signalisieren, dass eine Aufgabe fertiggestellt wurde oder dass eine Aktion ausgeführt werden kann. Die bereits heute auf Baustellen verwendeten Signale mithilfe visueller Zeichen können somit durch die digitalen systemgebundenen und dokumentierbaren Handbewegungen als zusätzliche Unterstützungen angesehen werden, z. B. wenn das Bodenpersonal mit Kranführerinnen oder Kranführern kommuniziert. Auch können verschiedene Abfolgen von Bewegungen bspw. das Öffnen einer Magazintür oder den gesicherten Zugang zu einer Baustelle ermöglichen (vgl. Bernaerts et al. 2014, S. 42).

Datenhandschuhe

Wie bei den Datenuhren bieten ebenfalls Datenhandschuhe im Rahmen der Digitalisierung gute Ansätze zur Verbesserung von Bauabläufen. Auch hier liegen die Einsatzgebiete größtenteils in der Steuerung, der Kommunikation oder der Datenaufzeichnung. Mit digitalen Handschuhen ist es bspw. möglich, Facharbeiterinnen und Facharbeiter vor Fehlgriffen im Rahmen ihrer Arbeitstätigkeiten zu warnen (vgl. Samulat 2017, S. 31). Darüber hinaus können während der Nutzung von Datenhandschuhen ebenfalls auch stets Messungen vorgenommen werden (vgl. Peddie 2017, S. 273). Entsprechende Aufzeichnungen sind insbesondere auch für projektübergreifende Auswertungen relevant, da die gesammelten Informationen bspw. dabei helfen, Arbeitshandlungen, z. B. aus ergonomischer Sicht, anzupassen (vgl. Aromaa 2018, S. 56). Generell können Aufzeichnungen bei der Verwendung von Datenhandschuhen über zwei übergeordnete Systeme durchgeführt werden. Während für eine sensorbasierte Variante Tracker als Basis dienen (vgl. Abschnitt 2.4.2), stellt die auf *Computervision* basierende Version die Möglichkeit bereit, Bewegungen mithilfe von Kameras festzuhalten (vgl. Aromaa 2018, S. 56).³⁵ Datenhandschuhe können ebenfalls helfen, realitätsnahe Trainings-Szenarien in einer *Virtual Reality*³⁶ durchzuspielen oder Roboter und Maschinen in einem soziotechnischen System *Baustelle* zu steuern (vgl. Behrendt 2016, S. 45).

³⁵Auf den Begriff der *Computervision* wird in Abschnitt 2.4.3 genauer eingegangen.

³⁶Virtual Reality wird in Abschnitt 2.4.2: *Computergenerierte Realitäten: Nutzung von AR auf Baustellen* behandelt.

Exoskelette und Roboter-Westen

Grundlegend ist bei Exoskeletten zwischen aktiven und passiven Varianten zu unterscheiden. Während bei aktiven Exoskeletten menschliche Kräfte maschinell gesteigert werden, benötigen passive Vorrichtungen keine zusätzliche Energiezufuhr (vgl. Willmott Dixon 2018, o. S.; Wieckhorst 2019, S. 30). Eine als aktiv anzusehende *EksoVest* des Unternehmens *Ekso Bionics* wird bspw. an den Hüften befestigt. Von dort besteht eine Verbindung zu zwei mechanischen Schultern. Als passive Variante kann daneben das Exoskelett *Paexo* genannt werden (vgl. Wieckhorst 2019, S. 30). Die Westen werden in erster Linie angewendet, um schwere Gegenstände zu heben, ohne den Körper über längere Zeiträume nachhaltig zu schädigen (vgl. Ekso 2018, o. S.; Sacros 2018, o. S.).³⁷ Darüber hinaus lassen sich mithilfe von Sensorik auch Daten sammeln, die wiederum für weitere arbeitserleichternde Maßnahmen präventiv herangezogen werden können (vgl. Winkelhake 2017, S. 71). Denkbar sind zudem Kombinationen der Exoskelette mit digitalen, auf Sicherheitsaspekte ausgelegte Komponenten. So ist es z. B. bei verstärkten Mensch-Maschinen-Interaktionen sinnvoll, mithilfe von Blinklichtern oder Signaltönen die Fachkräfte vor Gefahren zu warnen (vgl. WakeCap 2018, o. S.).

³⁷Zur Arbeitserleichterung siehe auch Abschnitt 3.1.2 *Vor- und Nachteile der Digitalisierung für die Bauausführung*.

2.4.2 Computergenerierte Realitäten: Nutzung von AR auf Baustellen

Den *Computergenerierten Realitäten* zugehörig werden in diesem Abschnitt die beiden Technologien der *Virtual Reality* (VR) und der *Augmented Reality* (AR) beschrieben.³⁸ Auch wenn beide Varianten im Hinblick auf eine Verknüpfung mit BIM relevant sind, liegt der Fokus im vorliegenden Abschnitt insbesondere auf der *Augmented Reality*, da diese insbesondere für Baustellenarbeitsprozesse ein großes Potenzial aufweisen. *Virtual Reality* bietet sich vordergründig als unterstützendes Hilfsmittel in Planungsprozessen an und wird demnach nur kurz erläutert. Auch das breite Spektrum von Kombinationsmöglichkeiten im Rahmen von *Mixed Reality* wird ebenso wenig betrachtet wie die *Augmented Virtuality*, bei der es sich überwiegend um eine virtuelle Welt handelt, die stellenweise mit realen Anteilen angereichert ist (Butz & Krüger 2017, S. 234).³⁹

Virtual Reality (VR)

Virtual Reality (VR) bietet Möglichkeiten, computergenerierte, interaktive und in Echtzeit darstellbare Umgebungen zu erschaffen (vgl. Hausstädtler 2010, S. 13; Schäfer 2012, S. 7; Mehler-Bicher & Steiger 2014, S. 167; VDI 2552-2 2018, S. 7). Nach Haghsheno et al. (2019) handelt es sich bei Virtual Reality um eine vollständig computergenerierte 3D-Darstellung von Gegenständen ohne Kopplung zur realen, physischen Welt, in der sich der Betrachter bewegen kann (vgl. ebd., S. 48). Interaktionen auf Seiten der Nutzerinnen und Nutzer innerhalb dieser Welten sind dabei durch potenzielle Manipulierungen von visualisierten Elementen ebenfalls möglich (vgl. Hausstädtler 2010, S. 13; VDI 2552-2 2018, S. 7). Befinden sich Anwenderinnen und Anwender in einer virtuellen Realität, wird i. d. R. von einer *Immersion* gesprochen, bei der die Personen in eine von der Realität abgeschirmte Welt *eintauchen* (vgl. Hausstädtler 2010, S. 180; Aust 2016, S. 50; Bernert 2017, S. 30; Butz & Krüger 2017, S. 232). Die Immersion sorgt damit durch die Überlagerung der vorhandenen Umgebung für das zeitweise Ausschalten der realen Welt (vgl. Mehler-Bicher & Steiger 2014, S. 167; VDI 2552-2 2018, S. 7).

Die häufigsten Ausgabegeräte für VR-Szenarien sind CAVEs, 3D-Wände, VR-Brillen oder die bereits thematisierten mobilen Endgeräte (vgl. Butz & Krüger 2017, S. 10 und S. 224; Malone 2017, o. S.; Haghsheno et al. 2019, S. 48). Innerhalb eines CAVEs (engl. für Cave Automatic Virtual Environment) können mehrere Personen eine vom Computer erzeugte virtuelle Welt gemeinsam betreten (vgl. Visbox 2016, o. S.). Solche Vorrichtungen werden bisher jedoch meist nur von großen Firmen bzw. Forschungseinrichtungen genutzt (vgl. Butz & Krüger 2017, S. 224).

³⁸Der Begriff der *Realität* ist in Bezug auf holografische Darstellungen diskussionswürdig, da man v. a. bei der virtuellen Realität nicht von einer *Wirklichkeit* sprechen kann. Aufgrund der Verwendung des Begriffes in der Fachliteratur wird er – auch mit Bezug zu den beiden gängigen Begriffen *Virtual Reality* und *Augmented Reality* – nachfolgend beibehalten.

³⁹Genauere Definition und Anwendungsmöglichkeiten zu den unterschiedlich auffassbaren Betrachtungsweisen von CGI und möglichen Kombinationen können u. a. in Hausstädtler (2010, S. 14) Mehler-Bicher & Steiger (2014, S. 10) Bernert (2017, S. 30) oder Kölzer & Boll (2018, S. 42-45) nachgelesen werden.

Aber auch bei Verwendung von VR-Brillen besteht ebenfalls die Möglichkeit, Inhalte so darstellen zu lassen, dass verschiedene Beteiligte durch eine gemeinsame Vernetzung ein und dieselbe virtuelle Umgebung erleben. Headsets, wie die *Oculus Rift* oder die *HTC Vive* können dabei bereits heute einen hohen Grad an Immersion erzeugen (vgl. Butz & Krüger 2017, S. 224; Erlebach & Hoch 2017, S. 20). Auch mobile Endgeräte, wie z. B. Smartphones oder Tablets, sind schon heute für virtuelle Anwendungen ohne großen finanziellen Aufwand nutzbar. Unabhängig welches Medium gewählt wird, die Virtuelle Realität spielt nicht nur für private Bereiche (z. B. in Form von VR-Spielen), sondern mittlerweile auch für die Arbeitsgebiete der Architektur, des Bauingenieurwesens und darüber hinaus auch stellenweise für Baustellen eine große Rolle (vgl. Varjo 2019, o. S.). So ist es möglich, mobile CAVEs als Zelte auf oder neben Baustellen, z. B. für ortsnahe Präsentationen oder für Planungsbesprechungen, temporär zu errichten (vgl. Igloo 2019, o. S.).

VR-Szenarien bieten sich jedoch insbesondere für Entwurfs- und Konstruktionsprozesse an. So können Architektinnen und Architekten z. B. holographische Prototypen erstellen und dabei digitale Objekte für weitere Projektbeteiligte anschaulich bearbeiten (vgl. Hausstädtler 2010, S. 16; McDonnell 2017, S. 89). Darüber hinaus sind virtuelle Modelle in vielen Fällen ebenfalls eine wesentliche Grundlage für Entwurfspräsentationen bei Bauherrinnen und Bauherren (vgl. Berger 2017, S. 7; Dengler & Matthes 2018, S. 3-4).

Neben der Visualisierung logistischer Prozesse oder der Darstellung von Bauablaufsimulationen (vgl. Hausstädtler 2010, S. 15; Baier & Díaz 2017, S. 30; Malone 2017, o. S.) – die insbesondere auch für die Phase der Bauausführung von großer Bedeutung sind – bieten anschauliche Animationen im Rahmen von Virtual Reality, z. B. von FEM-Berechnungen oder von Kollisionsprüfungen, erhebliche Möglichkeiten für effektivere und nachvollziehbarere Arbeitsprozesse (vgl. Hausstädtler 2010, S. 15; Braun et al. 2015, S. 25). Die mit allen projektspezifisch zusammenhängenden Entscheidungen können mithilfe von VR durch eine gemeinsame Kommunikation in interdisziplinären Gruppen, z. B. bei Planungs- oder Baubesprechungen, realitätsnäher umgesetzt werden (vgl. Braun et al. 2015, S. 25; Aust 2016, S. 52; Wolfangel 2017, S. 26; Chevin 2018b, o. S.; Cousins 2018b, o. S.; Haghsheno et al. 2019, S. 53). Nicht nur die Möglichkeit, Anpassungen von Größenverhältnissen interdependent und zeitnah vorzunehmen, auch die intuitive Navigation und die Option, verschiedene Elemente in Echtzeit darzustellen, schaffen anschauliche Besprechungsgrundlagen für projektspezifische Entscheidungen (vgl. Aust 2016, S. 51). Über potenzielle Expertendiskussionen im Rahmen einer virtuellen Umgebung hinaus können komplexe Sachverhalte nicht nur für fachfremde Personen verständlicher dargestellt werden, auch ist für viele Prozesse und Entscheidungen eine physische Anwesenheit der jeweiligen Projektbeteiligten nicht mehr zwingend erforderlich. So bieten bspw. Avatare die Möglichkeit, Entscheidungen ohne räumliche Bindung schneller und damit effektiver und effizienter treffen zu können (vgl. Aust 2016, S. 51; Bernstein 2017, S. 22). Ein weiterer Vorteil von Virtual Reality liegt zudem in der Nutzung für diverse Ausbildungs-, Schulungs- oder Trainingsprozesse (vgl. Hausstädtler 2010, S. 15).

Als Nachteil von VR kann bei CAVEs die Ortsabhängigkeit und bei Headsets das Gewicht bzw. die Gewichtsverteilung genannt werden. Längeres Tragen führt bei VR-Brillen ggf. nicht nur zu einer falschen Haltung, sondern auch zu unangenehmen Nebeneffekten, wie z. B. Schwitzen an den Kontaktstellen zwischen Kopf und Headset. Entsprechend sind die Brillen heutzutage noch nicht für längere Arbeitstätigkeiten zu empfehlen. Ganz abgesehen von bisher nicht absehbaren psychologischen Effekten, die sich ergeben, wenn Menschen sich lange in einer virtuellen Welt aufhalten.

Augmented Reality (AR)

Bei *Augmented Reality* (AR) werden – anders als bei der zuvor beschriebenen Virtual Reality – Wirklichkeit und Virtualität miteinander kombiniert.⁴⁰ Es handelt sich um eine sogenannte „erweiterte Realität“ (Hausstädtler 2010, S. 177). Während VR die echte Realität mittels künstlicher Sinneseindrücke komplett ersetzt, werden bei der Verwendung von AR-Technologien computergenerierte Einblendungen der realen Umwelt hinzugefügt (vgl. Mehler-Bicher & Steiger 2014, S. 1 und S. 165; Bernert 2017, S. 30; Butz & Krüger 2017, S. 233). Eine Kombination beider *Welten* stellt im Hinblick auf die im vorliegenden Forschungsvorhaben betrachteten Baustellenarbeitsprozesse ein enormes Nutzungspotenzial für zukünftige Ausführungstätigkeiten – insbesondere bei Verwendung eines digitalen Bauwerksinformationsmodells – bereit. So können mithilfe von Augmented Reality bspw. computergestützte Anreicherungen innerhalb der Wirklichkeit eingeblendet und mit der realen Umgebung überlagert werden (vgl. Hausstädtler 2010, S. 177; Mehler-Bicher & Steiger 2014, S. 1 und S. 165; Butz & Krüger 2017, S. 234; Ong 2017, S. xxi; Mulatz 2018, o. S.; VDI 2552-2 2018, S. 3). Der Nutzen von AR im Rahmen von BIM wird v. a. durch das Einblenden optischer Informationen, z. B. von Grafiken, Texten oder Objekten, sofort ersichtlich. Somit ist es vor Ort nicht nur möglich, die direkte Lage von Bauelementen angezeigt zu bekommen, auch sind alle weiteren Informationen und Attribute, die für die anstehenden Tätigkeiten benötigt werden, ohne großen Suchaufwand vorhanden. Zur Anwendung von AR auf Baustellen können ebenfalls die bereits dargestellten mobilen Endgeräte herangezogen werden (vgl. Mulatz 2018, o. S.). So ist es bspw. möglich, relevante BIM-Daten, z. B. auf Tablets, einblenden zu lassen (vgl. Behaneck 2017a, S. 58; Peddie 2017, S. 102).

Da für die Verwendung der dargestellten mobilen Endgeräte jedoch mindestens eine Hand zum Festhalten eines Tablets oder Smartphones für die eigentlichen Baustellenarbeitsprozesse nicht zur Verfügung steht, bietet sich eine weitere, eigens für entsprechende Arbeitsschritte entwickelte AR-Technologie an. Mit Hilfe von Augmented Reality-Brillen, z. B. *Microsoft HoloLens* oder *Google Tango* (vgl. Bernert 2017, S. 30; Microsoft 2019, o. S.) können Objekte auch ohne Nutzung der Hände eingeblendet werden (vgl. Fellner 2018, S. 32).

⁴⁰Zur Historie von Augmented Reality sei an dieser Stelle auf Mehler-Bicher & Steiger (2014, S. 13) verwiesen.

Neben der bereits angesprochenen Kombination von virtueller Realität und realer Umwelt, spielen ebenfalls die Interaktion in Echtzeit, sowie der dreidimensionale räumliche Bezug der Objekte untereinander eine wesentliche Rolle im Rahmen von Augmented Reality (vgl. Azuma 1997, S. 3; Mehler-Bicher & Steiger 2014, S. 2 und S. 10; Butz & Krüger 2017, S. 233 und S. 239). Für eine korrekte Positionierung sind Referenzpunkte, z. B. mit Markern, Trackern oder Kameras nötig (vgl. Mehler-Bicher & Steiger 2014, S. 2 und S. 25; Bernert 2017, S. 30; Butz & Krüger 2017, S. 226),⁴¹ damit bspw. die geplanten Bauelemente an der richtigen Stelle errichtet werden können (vgl. BMWi 2017, S. 15; Dengler & Matthes 2018, S. 3).

Über eine passgenaue Positionierung computergenerierter Elemente hinaus ist es im Rahmen von AR-Anwendungen ebenfalls möglich, virtuelle Objekte im Raum zu verschieben oder diese mit anderen dargestellten Erweiterungen zu verknüpfen (vgl. Butz & Krüger 2017, S. 239). Durch entsprechende Manipulationen der zur Verfügung stehenden Objekte können Facharbeiterinnen und Facharbeiter interaktiv in den Gesamtprozess eingebunden werden. So ist es bspw. im Hinblick auf eine lückenlose Dokumentation sinnvoll, dass nach Herstellung eines Bauteils von den Ausführenden bestätigt wird, dass bestimmte Arbeiten abgeschlossen wurden oder projektbezogene Teilprozesse stattgefunden haben (vgl. BMWi 2017, S. 15). Anhand von Explosionszeichnung oder explizit ausgewählten Objekten können Baufachkräfte ebenfalls die dargestellten Elemente vor Ort, z. B. durch bewegen oder drehen, den entsprechenden Gegebenheiten anpassen (vgl. Mehler-Bicher & Steiger 2014, S. 16). Der bereits angesprochene Vorteil zur Nutzung beider Hände bei Verwendung von AR-Headsets kann durch eine erweiterte Interaktion in Form von Gesten- und Spracherkennungen zusätzlich ergänzt werden (vgl. Bernert 2017, S. 30). Da insbesondere auf Baustellen stets hohe Sicherheitsaspekte in Betracht gezogen werden müssen, sind im Hinblick auf die Verwendung der heute noch relativ großen und auch recht schweren AR-Brillen besondere Maßnahmen erforderlich. Um die Anwendung von Augmented Reality auf Baustellen ohne komplizierte und ggf. sicherheitsgefährdende Anpassungen möglich zu machen, hat die Firma *Trimble* in Kooperation mit *Microsoft* eine Kombination aus Bauhelm und AR-Headset entwickelt (vgl. Archinet 2019, o. S.; Constructible 2019 o. S.).

Neben dem bereits beschriebenen Abgleich digitaler Planungsdaten mit vorhandenen realen Geometrien, z. B. durch Kollisionskontrollen im Rahmen von BIM (vgl. Mehler-Bicher & Steiger 2014, S. 16, S. 81 und S. 144; Formitas 2018, o. S.; Klemm-Albert et al. 2018, S. 190), und der Möglichkeit, zusätzliche Beschriftungen oder Arbeitsanweisungen darstellen zu lassen (vgl. Mehler-Bicher & Steiger 2014, S. 16; Dengler & Matthes 2018, S. 3), können AR-Anwendungen – genau wie bei der Virtual Reality – ebenfalls für Ausbildungs- und Trainingsprogramme herangezogen werden (vgl. Mehler-Bicher & Steiger 2014, S. 81; Peddie 2017, S. 102). Darüber hinaus bietet Augmented Reality insbesondere im Hinblick auf die Aktualität von Daten und Informationen für

⁴¹Für eine Übersicht zu unterschiedlichen Markern kann Mehler-Bicher & Steiger (2014, S. 28-41) herangezogen werden.

Arbeitsabläufe auf Baustellen erhebliche Vorteile. So liegen in Bau- oder Zeichnungsbuden häufig mehrere Pläne neben- oder übereinander, so dass Baufacharbeiterinnen und Baufacharbeiter ggf. suchen müssen, welcher Plan der aktuellste ist. Mit Hilfe von AR besteht durch Zugriffe auf digitale Bauwerksmodelle eine schnellere und auch zuverlässige Möglichkeit, zeitnahe und positionsgetreue Informationen heranzuziehen. Damit einher geht ebenfalls die Option, die jeweiligen relevanten Bauteile explizit auszuwählen oder farbig, und damit ggf. besser erkennbar, an den entsprechenden Stellen einblenden zu lassen (vgl. Mehler-Bicher & Steiger 2014, S. 1-2, S. 81 und S. 126; Bernert 2017, S. 30; Formitas 2018, o. S.). Durch eine direkte Verknüpfung der Baufacharbeiterinnen und Baufacharbeiter über ein zentrales Bauwerksinformationsmodell geht mit AR ebenfalls eine Verbesserung der teaminternen und projektspezifischen Kommunikation einher (vgl. Mehler-Bicher & Steiger 2014, S. 81; McDonnell 2017, S. 89). So können Änderungen während der Bauausführung bspw. unmittelbar an die jeweiligen Projektteams übermittelt werden (vgl. Bernert 2017, S. 30). Auch das direkte Anzeigenlassen von Baustellen-Sicherheitsbereichen ist nicht nur im Hinblick auf eine zunehmende Interaktion von Menschen und Maschinen ein weiterer wichtiger und nennenswerter Vorteil von Augmented Reality (vgl. McDonnell 2017, S. 90).

Für den Einsatz von Augmented Reality bei der Anfertigung einer Schalung haben große Schalungshersteller bereits Software-Applikationen für die Verwendung auf Baustellen entwickelt (vgl. Doka 2019, o. S.; BGM 2019, o. S.). Mithilfe AR-fähiger Programme können mobile Endgeräte oder Headsets auf bestehende herstellereigene Schalungssysteme zurückgreifen und diese vor Ort einblenden (vgl. PERI 2019, o. S.; Doka 2020, o. S.). Über die Nutzung bereits existierender Vorgaben hinaus sind jedoch durch das Scannen von QR-Codes ebenfalls auch projektspezifische Schalungsvorgaben, die bspw. in einem BIM-Modell verortet sind, jederzeit abrufbar. Für die handwerkliche Herstellung von Schalungen mit Schaltafeln, Brettern und Kanthölzern findet Augmented Reality auf Baustellen bisher noch keinen Einsatz. Nichtsdestotrotz bieten sich Möglichkeiten für das Einblenden bereits zuvor geplanter Schalungen an, die auf Grundlage eines BIM-Modells konstruktiv vorgegeben sind.

Auch beim Verlegen von Bewehrungen kann AR sehr gut verwendet werden. Durch Einblendungen der notwendigen Stähle – die im Rahmen von Tragwerksbemessungen ermittelt wurden – können diese auf der Baustelle positionsgenau verlegt bzw. kontrolliert werden. Um eine genaue Verortung von Bewehrungen zu ermöglichen, wurde an der *Leibniz Universität Hannover* das *Holographic Computing* entwickelt, mit dem einzelne Stähle vor Ort – ohne die Verwendung zusätzlicher zweidimensionaler Pläne – verlegt werden können (vgl. Klemm-Albert et al. 2018, S. 189-197). Abweichungen zwischen Modell und Wirklichkeit sind bei manuellen Herstellungsprozessen i. d. R. nicht zu vermeiden. Um eindeutige Position vorgegeben zu können, ist es daher sinnvoll, Marker einzusetzen (vgl. ebd., S. 194). Gängige Marker sind bspw. die in Abschnitt 2.4.4 erwähnten QR-Codes.

In einem BIM-Modell sind über die Angaben zu den Lagen der Bewehrungen jedoch bspw. auch sämtliche Übergreifungslängen, Stababstände und Betondeckungen so exakt modelliert, dass nicht nur alle Verlegungen genau ausgeführt werden können, sondern ebenfalls auch alle baukonstruktiven Vorgaben berücksichtigt sind, wie z. B. das korrekte Einhalten von Betondeckungen (vgl. ebd., S. 192). Das Holographic Computing berücksichtigt demnach die am Bau üblichen Ausführungsungenauigkeiten und modelliert die Unschärfen resultierend aus der Präzision der Sensoren, den zulässigen Maßtoleranzen und den zulässigen Errichtungsungenauigkeiten gegenüber der exakt vorliegenden Modellgenauigkeit direkt im digitalen Gebäudemodell (vgl. ebd., S. 196). In der Praxis werden erste digitale Bewehrungsverlegungen bereits erprobt. So nutzt bspw. das Bauunternehmen *Max Bögl* detaillierte 3D-Modelle sowohl zur Werkstatt-, als auch zur Ausführungsplanung (vgl. Pflug & Schreyer 2015, S. 493). Auch bietet es sich an, spezifische Bewehrungselemente anzeigen zu lassen, die dann nicht nur für das eigentliche Verlegen, sondern auch für das Kontrollieren der Bewehrungslagen oder für einen Abgleich zur Abrechnung von Stahllisten herangezogen werden können (vgl. Junge 2018, S. A 16).

Nachteilig sollte festgehalten werden, dass bei der Verwendung von AR-Szenarien nicht nur sicherheitsrelevante Aspekte auf Seiten der Baufachhandwerkerinnen und Baufachhandwerker zu berücksichtigen sind, sondern dass die derzeitige Technik für einen Einsatz auf Baustellen in einigen Bereichen noch nicht weit genug ausgereift ist. So stellt nicht nur die erforderliche Rechenleistung ein zentrales, noch zu lösendes Problem dar (vgl. Mehler-Bicher & Steiger 2014, S. 144), auch sind die bisher marktführenden AR-Brillen aufgrund ihres jungen Entwicklungsstadiums noch nicht in vollem Umfang für den Einsatz auf Baustellen nutzbar. Beispielsweise ist das Sichtfeld von AR-Headsets in vielen Fällen noch stark eingeschränkt. Auch die Empfindlichkeit der notwendigen Tiefensensoren innerhalb der Brillen müssen insbesondere im Hinblick auf Sonneneinstrahlungen weiterentwickelt werden, damit nicht nur ein Einsatz innerhalb von Gebäuden möglich ist (vgl. Klemt-Albert et al. 2018, S. 190). Neben den aktuellen Anwendungsschwierigkeiten ist darüber hinaus stets zu beachten, dass AR-Brillen im Baustellenbetrieb kaputt gehen können. Dies stellt wiederum eine Gefahr für die Sicherheit der Baufachkräfte vor Ort dar.

2.4.3 Digitale Datenerfassung: Laserscanning und Sensor-Technologien

Im vorliegenden Abschnitt sind Technologien beschrieben, die v. a. für Vermessungsarbeiten und Bestandsaufnahmen auf Baustellen herangezogen werden. Übergeordnet kann zwischen dem *Laserscanning* – dem räumlichen Erfassen dreidimensionaler Geometriedaten – und den mit diesen Prozessen verbundenen, neu zu berücksichtigenden digitalen *Sensor-Techniken*, unterschieden werden. Insbesondere durch Kombinationen dieser beiden Erfassungssysteme sind im Rahmen der Digitalisierung erhebliche Potenziale für das Bauwesen möglich. Die mit digitalen Arbeitsmitteln durchführbare Datengewinnung vor Ort – bei der es auch um das Erkennen und Verarbeiten diverser Informationen geht – wird stellenweise auch als *Sensing* oder mit dem Begriff *Computer Vision* aufgefasst. Entsprechende Neuentwicklungen sind insbesondere im Hinblick auf die Methode BIM (s. Abschnitt 2.3) und in Kombination mit *Cyberphysischen Systemen* (s. Abschnitt 3.3.3) zunehmend von immer größerer Relevanz. Auch wenn die in diesem Abschnitt aufgeführten Technologien für die eigentlichen Ausführungstätigkeiten zum Herstellen von Bauteilen keine Verwendung finden – da sie häufig nur als Nebenprozesse im Rahmen von Arbeitsvorbereitungen, z. B. durch das Erfassen, Messen und Prüfen baulicher Ist-Zustände, angesehen werden –, sind sie für die weiteren Betrachtungen im vorliegenden Forschungsvorhaben dennoch von arbeitsprozessrelevanter Bedeutung.

Laserscanning zur Vermessung und Bestandsaufnahme

Seit Jahrzehnten ist das Ein- oder Aufmessen mit Gliedermaßstäben und Maßbändern bei Arbeitsvorgängen auf Baustellen gängige Praxis (vgl. Saidi et al. 2016, S. 1516). Neben der häufig traditionellen bzw. analogen Verwendung diverser Messwerkzeuge kommen auf größeren Baustellen zusätzlich Nivelliergeräte, Theodolite oder Tachymeter zum Einsatz. Bei Nutzung klassischer Vermessungsgeräte werden – abgesehen von größeren vermessungstechnischen Untersuchungen – die aufgenommenen Daten, z. B. durch den Polier, häufig noch per Hand auf Papierunterlagen notiert.

Nicht mehr wirklich neu, dafür aber noch recht wenig verbreitet, ist die Verwendung hochauflösender Laserscanner, die beim Aufmessen im Vergleich zu analogen Aufnahmeverfahren nicht nur effektiver, sondern auch zuverlässiger und präziser geworden sind (vgl. Ehm & Hesse 2014, S. 250; Jordan 2017, S. 134; Behaneck 2018a, S. 12; Ramge 2018, S. 72). Die meisten dieser digitalen Geräte enthalten neben den eigentlichen Scannmöglichkeiten ebenfalls viele weitere Standard- und Rechenfunktionen, z. B. eingebaute Optionen zur Messung von Entfernungen oder Neigungen (vgl. Behaneck 2018a, S. 13).

Bei Verwendung neuester dreidimensionaler Laserscanner kann übergeordnet zwischen zwei grundlegenden Vermessungsverfahren unterschieden werden. Das terrestrische 3D-Laserscanning hat sich in den letzten Jahren dabei als Messverfahren zur geometrischen Erfassung von Gebäuden im Bauwesen etabliert (vgl. Ehm & Hesse 2014, S. 243). Es stellt ein dreidimensionales berührungsloses Aufmaßverfahren dar, bei dem die Umgebung durch einen rotierenden Laser rasterförmig abgetastet wird (vgl. Plank et al. 2011, S. 43;

VDI 2552-2 2018, S. 5). Das Messsystem erfasst die Koordinaten beliebiger Objekte über Horizontal- und Vertikalwinkel sowie über die ebenfalls gemessenen Distanzen (vgl. Behaneck 2017b, S. 10). Die aus diesem Vorgang gewonnenen Daten, die als Punktwolke aus einem fein aufgelösten Abbild der gescannten Oberfläche entstanden sind, können zu Plänen oder 3D-Modellen abgeleitet werden und anschließend per USB-Stick, per Datenkabel oder über Funk auf mobile bzw. stationäre Rechner oder Aufmaßprogramme übertragen und in diesen ausgewertet werden (vgl. Behaneck 2017b, S. 10; Behaneck 2018a, S. 13; VDI 2552-2 2018, S. 5). Neben dem terrestrischen Laserscanning besteht alternativ die Möglichkeit ein Aufmaß mithilfe der Photogrammetrie durchzuführen. Dabei handelt es sich um ein Verfahren zur Vermessung von Objekten auf Grundlage von Bildern (vgl. Blankenbach 2015, S. 351; Díaz et al. 2017, S. 138; Amos 2018, o. S.).

Auf Baustellen bietet es sich im Rahmen von Aufmaßverfahren an, Geräte zu verwenden, die in einer ausreichenden Höhe einen großen Bereich erfassen können. So finden viele Bestandsaufnahmen mithilfe von Laserscannern, die i. d. R. auf Stativen befestigt sind, statt. Stellt man die Geräte an verschiedenen, aber untereinander abgestimmten Fixpunkten auf, so können mithilfe weniger Messungen kohärente Daten entstehen. Beispielsweise erfasst die digitale Kamera *Pro2-3D* des Unternehmens *Matterport* 3D-Daten vor Ort und fügt sie automatisch zu einem dreidimensionalen Modell zusammen (vgl. Matterport 2018, o. S.). Es entsteht eine Punktwolke, die unmittelbar in andere BIM-fähige Programme, z. B. *Autodesk ReCap* oder *Revit*, importiert werden kann. Der Laserscanner *TX8* des Unternehmens *Trimble* ist mithilfe einer *Ein-Tasten-Scanauslösung* in der Lage, eine Million Punkte pro Sekunde zu messen (vgl. Trimble 2018, o. S.). Auch hier sind die gescannten Daten für weitere modellzentrierte Anwendungen im Rahmen von BIM nutzbar.

Neben der Verwendung von Stativ-Lasern existieren auf dem Markt bereits viele Hand-Laserscanner. Einer dieser Scanner wurde bereits in Abschnitt 2.4.1: *Mobile Endgeräte und Wearable Computing* genannt: der *Freestyle*-Scanner des Unternehmens *Faro* (vgl. Faro 2018, o. S.). Nicht nur die vielfältigen variablen Einsatzmöglichkeiten dieser mobilen Geräte sprechen für eine Verwendung auf Baustellen, auch die hier ebenfalls durchführbaren direkten Übertragungen von 3D-Scandaten in viele gängige Softwarelösungen ermöglichen eine lückenlose und effektive Anwendung (vgl. Behaneck 2018a, S. 12-13; Faro 2018, o. S.; Geoslam 2018, o. S.).⁴²

Der *Leica DISTO D810* ist bspw. ein Laserdistanzmesser, der über eine Ein-Knopf-Bedienung gestartet und auf 1 mm genau messen kann. Er verfügt über einen Touchscreen, eine integrierte Kamera, einen Neigungssensor und eine Bluetooth-Schnittstelle (vgl. Leica 2019, o. S.). Solche „digitalen Zollstöcke“ (Behaneck 2018a, S. 14) kommen bereits heute auf Baustellen zum Einsatz. Die sehr robusten Geräte messen dabei nicht nur überaus zuverlässig, sondern auch viel genauer als traditionelle Gliedermaßstäbe

⁴²Für einen tabellarischen Produktvergleich von 20 auf dem Markt erhältlichen Laserdistanzmessern siehe Behaneck (2018a, S. 14-17).

(vgl. ebd.). Der ebenfalls auf dem Markt erhältliche *Spike Smart Laser* kann – wie bei den mobilen Endgeräten in Abschnitt 2.4.1 bereits erläutert – als Aufsatz an Smartphones oder Tablets angebracht werden (vgl. IKE 2019, o. S.). Mithilfe entsprechender Ergänzungen sind Messungen durch die Aufnahme von Photos direkt auf einem mobilen Endgerät möglich, z. B. indem Entfernungen, Höhen oder Flächen in Kombination mit GPS-Lokalisierungen aufgezeichnet und unmittelbar dokumentiert werden (vgl. ebd.). Der *Leica BLK360* ist darüber hinaus ein mit den zuvor dargestellten Stativ-Geräten vergleichbarer, bildgebender Laserscanner. Aufgenommene Daten können hier unmittelbar mit kompatiblen BIM-Programmen weiterverwendet werden, z. B. mit der *Autodesk-App ReCap Pro* (vgl. Leica 2019, o. S.).

Unabhängig, ob es sich um stationäre oder um tragbare Scanvarianten handelt, für jede Aufgabe bieten sich passende und projektspezifische Lösungen an. So können neben tachymetrischen 3D-Aufmaßen digitale Laserscans oder aber auch kombinierte Aufmaßverfahren im Rahmen von Baustellenarbeitsprozessen stets in Erwägung gezogen werden (vgl. Behaneck 2017b, S. 10).

Zusätzlich zu den hier dargestellten Möglichkeiten nehmen im Zuge der Digitalisierung ebenfalls Scanverfahren zu, die mithilfe von Drohnen großflächige und v. a. für Menschen schwer erreichbare Bereiche aufnehmen können.⁴³ Bereits heute ist es möglich, mit diversen Fluggeräten in kurzer Zeit exakte und für eine Weiterverarbeitung relevante digitale Scandaten zu erzeugen (vgl. Mikeleit 2018, S. 36). Aber nicht nur für Bauwerke, auch für ganze Areale können effektiv Informationen mithilfe von Flugdrohnen gesammelt werden (vgl. Viscan 2019, o. S.). Eine Option bietet dabei die Kombination mit *Lidar*-Scannern, die nicht nur in der Lage sind, Punktwolken aufzunehmen, sondern darüber hinaus auch Fotos oder thermische Aufnahmen erzeugen können (vgl. Bluesky 2018, o. S.).⁴⁴

Neben den bereits angerissenen Vorteilen des digitalen Laserscannings können unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten v. a. die präzisen Datenaufnahmen – die sich bei Verwendung dreidimensionaler Lasergeräte und der hohen Auflösungen fast schon als obligatorisch darstellen – als positive Aspekte hervorgehoben werden. Damit einhergehend sind es nicht nur die schnellen und effektiven Umsetzungen von Bestandsaufnahmen vor Ort (vgl. Berger 2016, S. 10; Behaneck 2018a, S. 12; Trimble 2018, o. S.), sondern insbesondere auch die Möglichkeiten der direkten Datenweiterverarbeitung und die mit diesen beiden Faktoren verbundenen und fast nicht mehr vorhandenen Lohn- und Arbeitskosten, die einen ökonomisch-nachhaltigen Einsatz des Laserscannings im Rahmen von Baustellenarbeitsprozessen entscheidend begründen. Ein Beispiel aus Ramge (2018) macht deutlich, wie wirtschaftlich-effektiv die Nutzung digitaler Aufnahmewerkzeuge ist. So braucht ein traditioneller Vermessungstrupp für das Aufmaß einer Großbaustelle

⁴³Auf Drohnen wird in Abschnitt 2.4.6: *Baurobotik und Drohneneinsatz auf Baustellen* noch genauer eingegangen.

⁴⁴*Lidar* (Light Detection and Ranging) ist eine auf Laserstrahlen basierende Methode zur optischen Abstands- und Geschwindigkeitsmessung.

von 16 ha rund eine Woche. Eine Vermessungsdrohne erledigt dies in einem vollautomatischen Flug innerhalb von acht Minuten (vgl. ebd., S. 72). Auch sind die für ein dreidimensionales Aufmaß notwendigen digitalen Geräte vom Preis-Leistungs-Verhältnis bereits so erschwinglich geworden (vgl. Schreyer 2016, S. 49), dass sich entsprechende Anschaffungen im Hinblick auf die genannten Kosteneinsparungen schnell amortisieren.

In der praktischen Anwendung machen sich die Vorteile des Laserscannings v. a. durch die einfache Handhabung, z. B. im Hinblick auf die unkomplizierte Aufstellung und die Bedienung mit nur einem Knopfdruck, sowie der damit einhergehenden Fehlerreduzierung, z. B. durch weniger Medienbrüche oder geringere Tipp- oder Additionsfehler, und darüber hinaus auch bei der Aufnahme von komplexen Bauwerken und Bauteilen, z. B. bei verzogenen Treppenläufen oder unebenen Räumen, bemerkbar (vgl. Schreyer 2016, S. 48; Behaneck 2017b, S. 10; Behaneck 2018a, S. 12-14; Leica 2019, o. S.).

Der bereits genannte Laserscanner *TX8* kann im Rahmen von *Scan to BIM* vor Ort aufgezeichnete Daten und Informationen unmittelbar für die Bauwerksinformationsmodelle bereitstellen (vgl. Trimble 2018, o. S.). Im Hinblick auf die zuvor aufgeführten Vorteile ist eine Kombination der digitalen Aufmaßgeräte mit der Methode BIM nicht nur effektiv und sinnvoll (vgl. Ehm & Hesse 2014, S. 250; Blankenbach 2015, S. 344, S. 356 und S. 360; Christalon & Neubauer 2015, S. 508; Behaneck 2018a, S. 12; Trimble 2018, o. S.), sondern im Sinne einer lückenlosen und nachvollziehbaren Dokumentation auch unerlässlich. Die mithilfe von 3D-Laserscannern echtzeitnahen Soll-Ist-Abgleiche des aktuellen Bauzustandes mit dem im Rahmen von BIM genutzten *Digitalen Zwilling* (vgl. Braun et al. 2015, S. 25; Schreyer 2016, S. 48), können nicht nur durch Einspielen von Daten und Informationen in das zentrale Bauwerksinformationsmodell erfolgen, sondern auch invers stattfinden. So unterstützen neuartige Messgeräte und Totalstationen die Scan- bzw. Arbeitsprozesse, indem sie notwendige Abmessungen direkt aus einem 3D-Modell auf die Baustellen holen (vgl. Ebnetter et al. 2015, S. 515; Schreyer 2016, S. 48; Behaneck 2018a, S. 14). Nach einer relativen Positionierung der Messeinrichtungen vor Ort sind die entsprechenden Scanner und Totalstationen in der Lage, einzelne Punkte mit dem Laser abzufahren, so dass genaue Positionen angezeigt werden können, z. B. um darzustellen, wo ein Loch gebohrt werden soll (vgl. Ebnetter et al. 2015, S. 515).

Laser können auch im Rahmen der eigentlichen Errichtung von Bauwerken sehr effektiv für einen Bewehrungsabgleich herangezogen werden. In Erweiterung der zuvor dargestellten Augmented Reality ist es bspw. möglich, dass Bewehrungsabnahmen durch den Einsatz innovativer Scanning-Methoden zukünftig entfallen können. Mithilfe von modellbasierten Tracking-Verfahren sind bspw. Soll-Ist-Abgleiche bzw. Qualitätskontrollen echtzeitnah durchführbar (vgl. Fellner 2018, S. 38).⁴⁵

⁴⁵Verschiedene Methoden zur Erkennung bereits verlegter Bewehrung können Klemt-Albert et al. (2018, S. 194-196) entnommen werden.

Nachteile bei Verwendung von digitalen Laserscannern ergeben sich insbesondere durch baustellenspezifische Rahmenbedingungen.⁴⁶ So sind die entsprechenden Technologien bei extremen Witterungseinflüssen, z. B. bei Regen oder Schnee, nur bedingt einsetzbar. Auch ist es wichtig, dass die neuartigen Vermessungs- bzw. Scanprozesse von Facharbeiterinnen und Facharbeitern vor Ort adäquat ausgeführt werden müssen. Dies ist v. a. im Hinblick auf die in Abschnitt 4.1 verorteten Informatisierungsprozesse im Rahmen von BIM relevant. Demnach ist es wichtig, dass einzelne Aufmaßschritte nicht nur richtig Anwendung finden, sondern auch, dass sie im Gesamtkontext der verschiedenen Bauvorhaben richtig zugeordnet werden. Um projektspezifische Daten und Informationen in Zukunft echtzeitnah – und ohne zusätzliche Arbeitsprozesse von Bau- oder Vermessungsingenieur/-innen auf Baustellen – in die jeweiligen BIM-Modelle einzuspeisen, kann davon ausgegangen werden, dass Vermessungsarbeiten und Bauaufnahmen zukünftig vermehrt von Baufachhandwerkerinnen und Baufachhandwerkern vor Ort durchgeführt werden.

Semantische Informationsaufzeichnungen durch Sensor-Techniken

Neben den bereits beschriebenen Aufnahmeverfahren von rein geometrischen Daten erlangen im Zuge der Digitalisierung – und im Hinblick auf die Erfassung zusätzlicher bauwerksrelevanter Informationen – auch innovative Sensor-Techniken für Prozesse auf Baustellen eine immer größere Bedeutung. Die entsprechenden systemtechnologischen Grundlagen wurden in den letzten Jahrzehnten bereits in anderen Branchen, z. B. in der Fahrzeugindustrie, entwickelt. Zu den für das Bauwesen relevanten Technologien zählen u. a. das *Global Positioning System* (GPS), das *Geo-* bzw. *Bodenradar* (GPR = *Ground Penetrating Radar*), das Verfahren zur Ermittlung von Betonreifegraden (*Concrete Maturity Meters*) oder die im folgenden Abschnitt 2.4.4 beschriebene RFID-Technik (vgl. Saidi et al. 2016, S. 1516).⁴⁷ Bei digitalen Vorgängen zur Aufnahme und Dokumentation relevanter Daten und Informationen wird stellenweise auch vom *Sensing* (vgl. ebd.), vom *Tracking* oder von der bereits erwähnten *Computer Vision* (vgl. Klemt-Albert et al. 2018, S. 192) gesprochen.

Unter den eigentlichen Sensoren sind i. A. Wahrnehmungsgeräte, wie z. B. Ultraschall, Radar, Lidar oder Kameras, zu verstehen, mit deren Hilfe Maschinen, Fahrzeuge oder Roboter in räumlichen und operationalen Kontexten platziert werden können (vgl. VDA 2015, S. 16 und 25; Jordan 2017, S. 328). Durch die Nutzung von *Lidar* sind unter Verwendung von Laserstrahlen zudem weitere systembedingte Aspekte, z. B. Abstände und Geschwindigkeiten, messbar (vgl. VDA 2015, S. 25; Jordan 2017, S. 134; Amos 2018, o. S.). Mithilfe von Sensor-Techniken können z. B. Roboter ihre Position stets neu berechnen, um an die jeweiligen Ziele zu gelangen, ohne mit weiteren Personen oder anderen Gegenständen zu kollidieren. Zusätzlich zu den Ortsbestimmungen sind Maschinen bzw. Sensoren ebenfalls in der Lage, Betriebsparameter, wie z. B. Temperaturen oder Luft-

⁴⁶Besonderheiten von Baustellen im Hinblick auf die Digitalisierung werden in Abschnitt 3.4 behandelt.

⁴⁷Weitere themenrelevante Technologien, die eher aus rein ingenieurwissenschaftlicher Sicht betrachtet werden können, z. B. *Material Sensing* oder *Surface Scanning*, sind in Reinhardt et al. (2016, S. 241-249 und S. 263-273) nachzulesen.

feuchtigkeiten, wahrzunehmen bzw. zu messen (vgl. Jordan 2017, S. 328). Durch eine Fusion von Orientierungsinstrumenten und den entsprechenden Informationssammlungen können anhand eines stetigen Datenabgleichs Abläufe optimiert bzw. autonom ausgeführt werden (vgl. VDA 2015, S. 25). Lidar-Scanner sind in autonomen Robotern bereits heute weit verbreitet, sowohl zur Wahrnehmung der Umgebung als auch zur Klassifizierung von Objekten (vgl. Jordan 2017, S. 134). Entsprechende kategorisierende Abläufe finden nicht nur bei der Verwendung von Lidar, sondern auch bei der *Computer Vision* statt, bei der durch maschinelles Sehen algorithmusbasierte Soll-Ist-Vergleiche vorgenommen werden (vgl. Klemt-Albert et al. 2018, S. 189). Dabei handelt es sich um ein rein optisches Verfahren ohne Marker oder Referenzpunkte, bei dem Bildinterpretationen und Mustererkennungen analysiert werden (vgl. ebd., S. 192).

Verwendung findet die Computer Vision im Bauwesen – auch im Hinblick auf die Prozesse im Massivbau – z. B. bei der fotogrammetrischen Bewehrungsabnahme im Rahmen von Building Information Modeling (vgl. ebd., S. 189). Ein für die Prüfung zu Grunde liegendes Abnahmemodell des im Vorfeld bemessenen Tragwerks muss dabei alle geometrischen und semantischen Informationen enthalten, die für eine computervisuelle Bewehrungsabnahme notwendig sind. Die geometrische Genauigkeit der Modellelemente kennt dabei die zulässigen Abweitungstoleranzen und Ausführungsungenauigkeiten. Beispielsweise sind im Modell alle Übergreifungslängen, Stababstände und Betondeckungen modelliert, während für diese in der Realität sehr unterschiedliche zulässige Bereiche der Abweitung existieren (vgl. ebd., S. 192). Für eine visuell-maschinelle Bewehrungsabnahme auf Baustellen wird zunächst eine grobe Registrierung der Kamerapositionen auf Grundlage des dreidimensionalen BIM-Modells durchgeführt. Anschließend erfolgen die jeweiligen Identifizierungen der abzunehmenden Bauteile sowie genauere Schätzung zwischen zweidimensionalen Bildern und den vor Ort lokalisierten Bewehrungsstählen, z. B. mittels Kontursignaturverfahren (vgl. ebd., S.191).

Sensor-Technologien können darüber hinaus auch zur Ermittlung von Betonfestigkeiten (vgl. Cousins 2018c, o. S.; Gschösser et al. 2019, S. 239) oder zur Überwachung von Aushärteprozessen herangezogen werden (vgl. Helmus 2009, S. 334).⁴⁸ Durch den entsprechenden Einbau von Sensorlösungen in Bauteilen sind Informationen während der Errichtung und Nutzung von Bauwerken – z. B. mithilfe des sog. Concremote-Sensors (vgl. Doka 2014, o. S.) – stets mess- und dokumentierbar. Aufgrund von Temperaturentwicklungen im Beton können bspw. Rückschlüsse darauf gezogen werden, welche Festigkeit der Beton aufweist und wann das Bauteil ausgeschalt werden kann (vgl. Bürger 2018, S. 58; Doka 2019, S. 52; Gschösser et al. 2019, S. 239). Die entsprechenden Sensoren zeichnen neben Temperaturen auch Drücke und Feuchtigkeiten auf, so dass eine Überwachung über den gesamten Erstellungs- und Lebensprozess von Bauwerken möglich ist (vgl. Helmus 2009, S. 334; Staub 2012, S. 27). Sobald der Beton ausschaltbereit ist,

⁴⁸Sensor-Technologien können insbesondere mit der RFID-Technik kombiniert werden. Genauere Angaben zum Einsatz der übergeordneten Auto-ID-Systeme können Abschnitt 2.4.4: *Auto-ID-Techniken: Kennzeichnung von Bauteilen durch RFID* entnommen werden.

erhalten Facharbeiterinnen und Facharbeiter bspw. eine Nachricht auf ihr mobiles Endgerät, z. B. auf ein Tablet oder eine Smartwatch (vgl. Bürger 2018, S. 58). In der Entwicklung befinden sich zudem intelligente Schalungen, die Projektbeteiligte unmittelbar darüber informieren sollen, wann die einzelnen Bauteile ausgeschalt werden können (vgl. ebd.).

Weitere Einsatzmöglichkeiten von Sensor-Techniken auf Baustellen bieten sich auch im Hinblick auf Verbesserungen zur Arbeitssicherheit oder zur Steigerung der Produktivität, z. B. im Rahmen von Orts- oder Verhaltensanalysen einzelner Baufachkräfte, an (vgl. Saidi et al. 2016, S. 1516; Mace 2017, S. 6; Son et al. 2019, S. 27 und S. 35). So sind bspw. Baufacharbeiterinnen und Baufacharbeiter von Kameras auf einer Baustelle stets erfassbar. Für entsprechende Analyse-Scans können bspw. Lidar-Scanner herangezogen werden, die nicht nur statische Umgebungen erkennen, sondern darüber hinaus auch bewegende Objekte identifizieren, dokumentieren, analysieren und in diesem Zuge ebenfalls klassifizieren (vgl. Jordan 2017, S. 134). Aber nicht nur für das Erfassen von Personen, auch für das Scannen von Fahrzeugen können digitale Sensoren herangezogen werden (vgl. Helmus 2009, S. 214). So sind bspw. visuelle Kennzeichen-Analysen von Lastkraftwagen oder Transportbeton-Mischern möglich, um An- und Abfahrzeiten von Lieferungen festzuhalten oder um logistische Abläufe zu optimieren. Auch Langzeit-Objektüberwachungen, wie bspw. das Messen und Aufzeichnen von Erschütterungen, Schwingungen, von Wasserabflüssen oder von Angaben zum Frostverhalten diverser Bauteile, sind mithilfe von Sensor-Techniken möglich (vgl. Staub 2012, S. 28).

Wie hier angedeutet können digitale Sensor-Techniken als echtzeitnahe Bindeglieder zwischen Planung, Ausführung und einer daran anschließenden Bauwerksnutzung effektiv und im Hinblick auf projektspezifische Dokumentationen sinnvoll eingesetzt werden (vgl. Sharif 2015, S. 54; Klemt-Albert et al. 2018, S. 189). Im Rahmen von BIM spiegeln sich diese Vorteile insbesondere hinsichtlich der bereits im Vorfeld genannten und am gesamten Lebenszyklus orientierten Informationskette wider. Durch einen direkten Vergleich von Soll- und Ist-Zuständen, z. B. mithilfe der hier skizzierten Computervision oder durch eine empirisch sichere Entscheidungsgrundlage aufgrund exakter Angaben von verbauten digitalen Sensoren, bieten sich insbesondere im Hinblick auf eine immer stärker zunehmende Mensch-Maschine-Interaktion nicht nur innerhalb von Baustellenarbeitsprozessen viele Einsatzgebiete, sondern es ergeben sich darüber hinaus auch weitere wirtschaftliche Vorteile, z. B. durch Kosteneinsparungen und Qualitätssteigerungen (vgl. Klemt-Albert et al. 2018, S. 189 und S. 191; Doka 2019, S. 52).

Bei der Verwendung von Sensor-Technologien ist jedoch insbesondere im Rahmen der Computer Vision zu berücksichtigen, dass aufgrund der witterungsabhängigen und oftmals verunreinigten Arbeitsumgebungen auf Baustellen visuelle Ansätze mit Markern oder Referenzpunkten stellenweise sehr unpraktikabel sind (vgl. Klemt-Albert et al. 2018, S. 191). Auch ist zu berücksichtigen, dass die Transponder bzw. Sensoren an den richtigen Stellen stets korrekt – z. B. mit Clip-Systemen – eingebaut werden (vgl. Jehle et al. 2013, S. 149, S. 216 und S. 218). Durch den vermehrten Einsatz digitaler Sensoren

ist ebenfalls zu erwarten, dass Projektbeteiligte an einem Bauvorhaben ggf. nicht mehr in vollem Umfang nachvollziehen können, auf welchen Wegen entsprechende Informationen vermittelt werden. Eine Überprüfung ist dann i. d. R. nur noch bedingt bzw. auf Grundlage des zugehörigen Bauwerksinformationsmodells möglich. Auch der Datenschutz muss bei zentraler Anhäufung in einem BIM-Modell – v. a. im Hinblick auf Tätigkeiten von Fachhandwerkerinnen und Fachhandwerkern – stets berücksichtigt und bestenfalls frühzeitig diskutiert werden.

2.4.4 Auto-ID-Techniken: Kennzeichnung von Bauteilen durch RFID

Anknüpfend an die im vorherigen Abschnitt 2.4.3 beschriebenen Sensortechniken werden nachfolgend die mit den dort bereits erwähnten Laser- bzw. Tracking-Systemen kombinierbaren *Auto-Identifikationstechniken* erläutert. Dafür ist zu Beginn eine einleitende Übersicht zu generellen Anwendungsmöglichkeiten der stellenweise sehr unterschiedlichen Ausführungsvarianten dargestellt. Daran anschließend wird in erster Linie die innerhalb der Auto-ID-Technologien verortete und für die Bauausführung überaus relevante *RFID*-Technik (Radio Frequency Identification) genauer betrachtet.

Anwendungsmöglichkeiten von Auto-Identifikationstechniken im Bauwesen

Aus anderen Branchen entlehnt, können viele Arten von Auto-ID-Techniken auch für Prozesse auf Baustellen verwendet werden. Abbildung 2.3 zeigt die wichtigsten Systeme im Überblick.⁴⁹ Neben OCR, Chipkarten, biometrischen Systemen und Magnetstreifen – die alle vier für das Bauwesen weniger in Frage kommen – sind insbesondere QR-Codes, Barcodes und v. a. die RFID-Technik für Arbeitsprozesse auf Baustellen relevant.⁵⁰

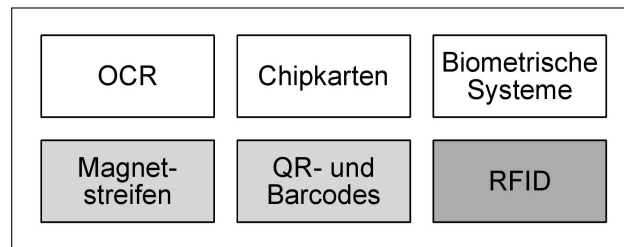


Abb. 2.3: Übersicht Auto-ID-Systeme (eigene Darstellung nach Klaubert 2011, S. 238)

Je nach Betrachtungsweise und Einsatzzweck sind Auto-ID-Techniken zukünftig v. a. für logistische Vorgänge auf Baustellen von immer größerer Bedeutung (vgl. Staub 2012, S. 26). Abhängig vom Anwendungsfall können dabei für die mannigfaltigen Prozesse und Abläufe stets unterschiedliche und kombinierte Auto-ID-Systeme – v. a. auch im Hinblick auf projektspezifische Gegebenheiten – verwendet werden (vgl. Helmus 2009, S. 200).

Alle dargestellten Systeme sind für Objektidentifizierungen einsetzbar, z. B. für das Auffinden von Bauprodukten, Bauelementen oder Baugeräten (vgl. Helmus 2009, S. 53 und S. 199; Klaubert 2011, S. 243; BM 2016, S. 109). So bringt bspw. eine echtzeitnahe, auf Auto-ID-Technik basierende und durch Verknüpfung und Steuerung von Bau- und Montageprozessen zusammenhängende Baustellenverwaltung viele Vorteile mit sich (vgl. Helmus 2009, S. 221; Forbau, 2012, S. 7; BM 2016, S. 109). Mithilfe vereinfachter, aber stets zusammenhängender Prozessschritte können baulegistische Prozesse schneller vollzogen und unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten vielfach optimiert werden (vgl. Helmus 2009, S. 199; Helmus 2011, S. 72; Forbau, 2012, S. 7). Insbesondere komplexe Großbaustellen lassen sich somit leichter beherrschen (vgl. Staub 2012, S. 28). Aber

⁴⁹Weitere Übersichten zu Auto-ID-Techniken finden sich u. a. in Helmus (2009, S. 199), Jehle et al. (2011, S. 6), Günthner & Schneider (2013, S. 37) und König et al. (2015, S. 13).

⁵⁰Bei OCR (Optical Character Recognition) handelt es sich um die optische Erkennung von Zeichen (vgl. Klaubert 2011, S. 19).

auch für kleine und mittelständische Handwerksbetriebe bieten die verschiedenen Auto-ID-Techniken aussichtsreiche Nutzungspotenziale (vgl. Schneider & Günthner 2009, S. 2; BM 2016, S. 109). So sind bspw. Lagerbestände jederzeit einsehbar, umsichtige Vorkehrungen zum Diebstahlschutz möglich oder stets echtzeitnahe Warenkontrollen durchführbar (vgl. Helmus 2009, S. 47; Schneider & Günthner 2009, S. 2; Helmus 2011, S. 72). Mithilfe von Barcodes kann somit nachvollzogen werden, ob Baustoffe oder Bauteile, z. B. Gipskartonplatten oder Zementsäcke, bereits geliefert wurden (vgl. Helmus 2009, S. 179 und S. 189).

Neben ausführlichen Personen- und Zutrittskontrollen auf Großbaustellen und einer damit einhergehenden Zeiterfassung, z. B. über Baustellenausweise (vgl. Helmus 2009, S. 46 und S. 50; Schneider & Günthner 2009, S. 2; Helmus 2011, S. 72; Klaubert 2011, S. 243; Staub 2012, S. 26 und S. 28), können auch Überprüfungen zum Tragen von Schutzausrüstungen mithilfe von Auto-ID-Techniken durchgeführt werden (vgl. Helmus 2009, S. 4 und S. 48; Helmus 2011, S. 72; Staub 2012, S. 26 und S. 28). Zudem sind die auf Großbaustellen häufig stattfindenden und bereits im Rahmen der Sensor-Techniken angesprochenen Erfassungen von Fahrzeugan- und abfahrten mit Auto-ID-Lösungen übersichtlich und effektiv zu bewältigen (vgl. Helmus 2009, S. 436; Helmus 2011, S. 72; Staub 2012, S. 28; BM 2016, S. 109; Berger 2016, S. 11). Über die zuvor genannten Einsatzmöglichkeiten innerhalb stationärer Lagerverwaltungen hinaus bieten Auto-ID-Techniken auch im Bereich von Geräteverbuchungen und Werkzeugorganisationen enorme Vorteile, insbesondere durch die Kennzeichnung von Baumaschinen, z. B. von Baggern oder Rüttelplatten, oder durch die Signatur baustellenrelevanter Werkzeuge, z. B. von Bohrern oder Handkreissägen (vgl. Helmus 2009, S. 47 und S. 447; Schneider & Günthner 2009, S. 8; Klaubert 2011, S. 243; BM 2016, S. 109). So können Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter bspw. über Smartphone-Apps sehen, auf welcher Baustelle sich welche Maschinen und Werkzeuge befinden (vgl. Gillies 2017, S. 18).

RFID auf Baustellen – Potenziale und Schwierigkeiten

Bei der RFID-Technologie handelt es sich um eine spezielle Form der Auto-ID-Technik, bei der auf Basis von Radiowellen Objekte automatisch und ohne Berührung identifiziert und lokalisiert werden können (vgl. Helmus 2009, S. 221; Jehle et al. 2011, S. 6; Staub 2012, S. 29; BM 2016, S. 9; BMWi 2017, S. 8). Übergeordnet sind dabei zwei Arten von Erfassungssystemen zu unterscheiden (vgl. Helmus 2009, S. 282). Bei fest installierten Systemen handelt es sich um eindeutig lokalisierte Kontrollen, bei denen festgelegte Vorgaben existieren, wann und wo einzelne Komponenten erfasst und dokumentiert werden (vgl. Bock & Linner 2015, S. xxi). Mobile Systeme ermöglichen hingegen flexiblere Varianten des Ein- und Auslesens von Objekten. So kann bspw. mithilfe des bereits in Abschnitt 2.4.1 erwähnten Handlersers sehr individuell festgehalten werden, welche Gegenstände eingetroffen sind bzw. welche Elemente verbaut wurden (vgl. Helmus 2009, S. 282; BM 2016, S. 109). Grundlegend werden bei all diesen Vorgängen Daten zwischen Transpondern (Tags) und den jeweiligen Erfassungs- bzw. Lesegeräten (Reader) ausgetauscht (vgl. Helmus 2009, S. 223; Jehle et al. 2011, S. 7; Staub 2012, S. 29).

Während ein Lesegerät innerhalb eines RFID-Systems die Schnittstelle zwischen den gespeicherten Informationen auf den einzelnen Tags und den unternehmensinternen oder projektspezifischen Speicherorten herstellt (vgl. Jehle et al. 2011, S. 9), handelt es sich bei den einzelnen Transpondern um die eigentlichen Träger der jeweiligen Informationen, z. B. um Stamm-, Material- oder Prozessdaten (vgl. Staub 2012, S. 29; Jehle et al. 2013, S. 58). RFID-Tags können dabei in den unterschiedlichsten Arten an Antennen gekoppelt und auf bzw. in diversen Trägermaterialien integriert werden (Helmus 2011, S. 8).

Für das Abspeichern von Informationen sind verschiedene Transponderformen erhältlich, z. B. in Münzform, in Glas- oder Plastikgehäusen, als Schlüsselanhänger, als Chipkarte oder als Smart Label (vgl. Jehle et al. 2011, S. 8-9). Wie bereits in Abschnitt 2.4.3 erwähnt, können RFID-Transponder nicht nur Bauteile und -elemente lokalisieren und orten, sondern in Kombination mit Sensor-Techniken auch ganze Prozesse kontrollieren und überwachen (vgl. Helmus 2009, S. 332; Staub 2012, S. 26-28). So sind bspw. Kennzeichnungen von Betonbauteilen mit RFID-Tags und zusätzlichen Sensorlösungen nicht nur aus bauphysikalischer Sicht, sondern auch im Hinblick auf projektspezifische Zustandserfassungen und Dokumentationen überaus interessant.⁵¹

Um die entsprechenden RFID-Funkchips im Rahmen von Bauwerkserstellungen korrekt anzubringen, ist es nicht nur wichtig, diese fachgerecht zu befestigen, sondern darüber hinaus auch am richtigen Ort zu platzieren. Unterschiede bestehen auch zwischen einer Anbringung innerhalb eines für längere Zeit bestehenden Bauteils oder an einem temporären Bauteil, wie einem Schalungselement. Soll z. B. ein Feuchtigkeitssensor in Kombination mit einem RFID-Tag innerhalb eines Betons eingebracht werden (vgl. Schneider & Günthner 2009, S. 2), sind entsprechende Vorkehrungen während der Herstellung des Bauteils mit zu berücksichtigen. Für eine Anbringung an Schalungselementen – die stellenweise auch schon mit integrierten RFID-Tags erhältlich sind (vgl. Gillies 2017, S. 18) – sind in erster Linie wiederum bauphysikalische Aspekte relevant (vgl. Helmus 2009, S. 450; Schneider & Günthner 2009, S. 8; Jehle et al. 2011 S. S. 70-71; Forbau 2012, S. 7). Gerade auf großen Baustellen müssen in entsprechenden Systemen verknüpfte Informationen stets einsehbar sein, damit der Bauablauf ohne aufwendige Suchvorgänge von Schalelementen kontinuierlich fortgeführt werden kann. RFID-Chips werden aber auch für kleinere Unternehmen – ebenfalls im Hinblick auf baubetriebliche Planungen – unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten immer interessanter. So ist es bspw. sinnvoll, alle schalungsrelevanten Elemente zentral zu verbuchen, so dass sie stets lokalisiert und effektiv genutzt werden können.

Ein Einbau lokalisierbarer Chips bietet sich darüber hinaus auch bei Mauerwerksarbeiten an, da stellenweise vorhandene Grifföffnungen oder Hohlräume für das Platzieren von Transpondern genutzt werden können. Sollte ein entsprechender Einbau nicht möglich sein, kann alternativ eine Öffnung an passender Stelle mit Hammer und Meißel her-

⁵¹Zu Einsatzmöglichkeiten von Transpondern in Stahlbetonbauteilen sei an dieser Stelle auf Helmus (2009, S. 468) verwiesen.

gestellt werden (vgl. Jehle et al. 2013, S. 219). Da notwendige Öffnungen jedoch bspw. beim Einbau in Vollziegel nicht vorhanden sind, besteht alternativ die Möglichkeit Transponder in verbreiterte Stoßfugen einzubauen (vgl. ebd., S. 220). Das Anbringen von Transpondern, z. B. an Bewehrungsstählen, spielt ebenfalls in der Kombination von Armierung und Beton eine wesentliche Rolle. So ist vordergründig stets zu beachten, dass die entsprechenden Elemente – unabhängig davon, ob es sich um lokalisierbare RFID-Chips oder um datenerfassende Technologien handelt – dort eingebaut werden, wo sie die gewünschten Informationen aufnehmen sollen.

Nicht nur im Hinblick auf verbesserte Arbeitsorganisationen im Rahmen von Schalungsarbeiten (vgl. Kölzer & Ranke 2014, S. 30), auch durch generelle und eindeutige Kennzeichnungen verschiedener einzelner Objekte (vgl. Helmus 2009, S. 50), ergeben sich weitere Vorteile bei der Nutzung der RFID-Technologie. So werden die bereits ange-deuteten Potenziale zur Optimierung von bauleistungsprozessen, z. B. durch echtzeitnahe Erfassung, Steuerung, Dokumentation und Kontrolle von Material-, Personal- und Informationsströmen, durch damit einhergehende Optimierungen von Auslastungen, Materialbewegungen und Bestandsreduktionen unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten effektiv ergänzt (vgl. Helmus 2009, S. 1, S. 50, S. 195 und S. 668; Schneider & Günthner 2009, S. 2 Staub 2012, S. 29; Kölzer & Ranke 2014, S. 30). Bei Verwendung eines RFID-Systems ist darüber hinaus nicht nur eine exakte Einbaureihenfolge verschiedener Bauelemente möglich (vgl. Staub 2012, S. 29), auch können Kontrollen direkt vor Ort bestätigen, ob die verbauten Elemente an den richtigen Stellen angebracht wurden (vgl. Helmus 2011, S. 72 u. S. 104). Im Vergleich zu anderen Auto-ID-Systemen bietet das RFID-Verfahren weitere – für die Bauausführung durchaus relevante – Vorteile. So kann als wichtiger Unterscheidungspunkt gegenüber den Barcode- und QR-Code-Systemen nicht nur die sichtkontaktlose Auslesbarkeit (vgl. Jehle et al. 2011, S. 6), sondern darüber hinaus auch die Haltbarkeit der einzelnen RFID-Tags aufgeführt werden. Die entsprechenden Transponder sind weitestgehend resistent gegen Verschmutzungen und gut geeignet, um unter rauen Umwelteinflüssen und starken mechanischen Belastungen eingesetzt zu werden (vgl. Helmus 2009, S. 50; Schneider & Günthner 2009, S. 1).

Insbesondere im Hinblick auf die bereits genannte, und im Rahmen von BIM überaus relevante Betrachtung des gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks, bietet die hier dargestellte RFID-Technik hinsichtlich einer mit ihr verbundenen lückenlosen Archivierung und Dokumentation weitere Vorteile (vgl. Forbau 2012, S. 8; Jehle et al. 2013, S. 44, BM 2016, S. 109). Die Informationen eines RFID-Systems können bei Verwendung eines zentralen Bauwerksinformationsmodells sehr gut mit der Methode BIM kombiniert werden. Die in den jeweiligen Transpondern enthaltenen Bauteilinformationen, z. B. Stammdaten, Material- oder Prozessdaten (vgl. Jehle et al. 2013, S. 58), entsprechen durch die objektorientierte Datenspeicherung der Logik des Building Information Modeling. Durch Verknüpfung der im Rahmen einer Modellerstellung erzeugten Informationen mit den bauleistungsbezogenen Daten eines RFID-Systems, können Vorgänge auf Baustellen zusammenhängend auch als „Internet der Dinge“ (Helmus 2009, S. 221) aufgefasst werden. Dabei entsprechen die Kennzeichnungen und Identifikationsnummern

der einzelnen Transponder den Attributen in einem BIM-Modell (vgl. ebd., S. 53). Ein Zusammenführen beider Systeme liefert damit nicht nur aus logistischer, sondern auch aus wirtschaftlicher Sicht erhebliche Vorteile.

Da die meisten RFID-Tags bereits heute schon sehr preiswert sind (vgl. Bock & Linner 2015, S. xxi), können entsprechende Identifikationssysteme unter monetären Gesichtspunkten als überaus wirtschaftlich angesehen werden. Nachteilig sind in erster Linie lediglich die häufig in Konkurrenz zueinander stehenden verschiedenen Auto-ID-Systeme (vgl. Helmus 2009, S. 668). Auch wenn die RFID-Technik für viele logistische Abläufe genutzt werden kann, bietet es sich unter projektspezifischen Aspekten stellenweise an, verschiedene Auto-ID-Varianten miteinander zu kombinieren. Dies hat jedoch zur Folge, dass nicht nur während der Planung komplexere Zusammenhänge zu berücksichtigen sind, sondern dass bei Anbringung der Transponder vor Ort auch auf Seiten der Bauausführung verstanden werden muss, wie die systembedingten Relationen untereinander aussehen. Ohne klare Nachvollziehbarkeit für alle Beteiligten können die Vorteile von Auto-ID-Systemen nicht in vollem Umfang genutzt werden. Im Rahmen einer Einbindung von entsprechenden Systemen in Baustellenarbeitsprozesse geht ebenfalls eine verstärkte Mensch-Maschine-Interaktion einher. So werden bei Verwendung unterschiedlicher Systeme, und damit auch unterschiedlicher Lesegeräte, besondere Anforderungen an das Baustellenpersonal hinsichtlich Handhabbarkeit und Nutzung gestellt (vgl. König 2009, S. 86). Zudem muss im Hinblick auf die Verwendung der einzelnen Geräte, wie schon bei den mobilen Endgeräten in Abschnitt 2.4.1 aufgeführt, bei starker Sonneneinstrahlung berücksichtigt werden, dass die Reader ggf. aufgrund der schlechten Lesbarkeit der Displays nur bedingt einsetzbar sind (vgl. ebd.). Darüber hinaus muss trotz leichter Anbringung von RFID-Tags darauf geachtet werden, wie die unterschiedlichen Transponderformen an den verschiedenen und divergenten Baustoffen zu befestigen sind. In Kombination mit Sensoren und GPS stellt die RFID-Technik jedoch eine überaus wirtschaftliche Option innerhalb von Baustellenarbeitsprozessen dar.

2.4.5 Additive Fertigung und 3D-Beton-Druck

Auch für die Herstellung großmaßstäblicher Betonelemente bieten sich im Zuge der Digitalisierung bereits aussichtsreiche Möglichkeiten mit vielversprechenden Ansätzen zur Fertigung auf Baustellen an. Im vorliegenden Abschnitt werden neben dem aktuellen Stand des digitalen Betonbaus in Praxis und Forschung auch die für das Bauwesen relevanten 3D-Druck-Verfahren vorgestellt. Darüber hinaus finden zudem Diskussionen zur potenziellen Einbindung der Technologie auf Baustellen sowie den damit einhergehenden Schwierigkeiten statt. Neben einigen kommerziellen Unternehmen, z. B. *XtreeE* (vgl. XtreeE 2019, o. S.), beschäftigen sich bereits viele Universitäten und Forschungseinrichtungen mit den Möglichkeiten des digitalen bzw. dreidimensionalen Betondrucks. So arbeiten in Europa bspw. die Technischen Universitäten in München (vgl. TUM 2017, o. S.), in Dresden (vgl. Wieckhorst 2017, S. 6), in Zürich (vgl. Strunge 2018, S. 84), in Braunschweig (vgl. Kloft et al. 2019, S. 28-37) oder in Eindhoven (vgl. TUE 2019, o. S.) an baustellentauglichen 3D-Druckverfahren mit Beton.

Übersicht möglicher Beton-Druckverfahren für das Bauwesen

Der 3D-Druck wird allgemein auch als *Generatives Verfahren* oder als *Additive Fertigung* bezeichnet (vgl. Winkelhake 2017, S. 341; Hafner & Berlack 2018, S. 53). Es handelt sich bei diesen modernen Druckprozessen einfach ausgedrückt um eine sukzessive bzw. schichtweise Herstellung von Bauteilen (vgl. BMWi 2017, S. 18; Schach et al. 2017, S. 355; Gausemeier & Kage 2017, S. 292; Winkelhake 2017, S. 66 und S. 341; Hafner & Berlack 2018, S. 53; Strunge 2018, S. 84). Für die Anwendung auf Baustellen ist insbesondere das extrusionsbasierten Verfahren interessant, bei dem definierte Ablagen kleiner Materialtropfen oder -stränge aufeinandergeschichtet werden. Durch translatorische Bewegungen von Extrusionsdüsen wird dabei ein Bauteil – ähnlich dem Mauerwerksbau – nach und nach erstellt (vgl. Schach et al. 2017, S. 358).

Zusätzlich zu den durch Extrusion hergestellten Betonbauteilen existieren drei weitere Verfahren, die für Einsätze auf Baustellen Relevanz aufweisen.⁵² Es handelt sich um die *selektive Bindung*, die *schichtweise Betonablage* und die *adaptive Gleitschalung* (vgl. Mechtcherine & Nerella 2018a, S. 277; Mechtcherine & Nerella 2018b, S. 497).⁵³ Für das zuvor genannte Extrusionsverfahren, bei dem die einzelne Schichten bzw. Filamente lagenweise übereinander gelegt werden, findet sich auch der Begriff des *Contour Craftings* wieder. Es handelt sich bei dieser Art des Betondrucks um eine bisher sehr weit verbreitete Methode (vgl. Mechtcherine & Nerella 2018b, S. 497).

⁵²Für eine Übersicht zu Beton-Druckverfahren wird auf Mechtcherine & Nerella (2018a) verwiesen.

⁵³Bei der selektiven Bindung werden dünne Sandschichten Lage für Lage mit einem Gemisch aus Zement und Wasser getränkt. Nach dem Abbinden aller Schichten lässt sich der überschüssige Sand entfernen, übrig bleibt die gewünschte Betonstruktur (vgl. Henke 2018, S. 34).

Auch wenn das Contour Crafting viele Potenziale zur Herstellung von Massivbauteilen bereithält, können bedingt durch die schmale Geometrie der extrudierten Stränge bisher ausschließlich Feinkornbetone eingesetzt werden, die wiederum nicht den geltenden Betonnormen entsprechen (vgl. Mechtcherine & Nerella 2018a, S. 282). Über diese technischen Probleme bei den eigentlichen Druckvorgängen hinaus, ist zudem die obligatorische Frage zur Berücksichtigung von Bewehrungen bisher nicht erfolgreich beantwortet worden. Es existieren zwar erste Lösungsansätze, diese sind zum aktuellen Stand jedoch weder praxistauglich, noch wirtschaftlich. Ohne entsprechende Armierungen können somit 3D-gedruckte Bauwerke vorerst nur als Ersatz für den traditionellen Mauerwerksbau angesehen werden (vgl. Schach et al. 2017, S. 360; Brehm 2019, S. 89).

In China wurden seit 2014 bereits mehrere einfache Häuser bis 200 m² Bruttogrundfläche, eine Villa und ein sechsgeschossiges Gebäude gedruckt (vgl. Schach et al. 2017, S. 357; Koutsogiannis 2018, o. S.). Auf den Philippinen sind ein Jahr später durch Portalroboter mehrere Bungalowbauwerke in additiver Bauweise erstellt worden (vgl. Schach et al. 2017, S. 357).⁵⁴ Auch in Russland ist ein komplettes Haus im Jahre 2017 hergestellt worden (vgl. Gillies 2017, S. 18; Ravencroft 2017, o. S.). In Dubai wurde ein Jahr zuvor bereits das erste gedruckte Bürogebäude errichtet (vgl. Koutsogiannis 2018, o. S.). Das erste additiv gefertigte Haus auf europäischem Boden entstand im Jahr 2018 in Mailand (vgl. Arup 2018, o. S.). Dieses eingeschossige Gebäude wurde – wie auch die Bungalows auf den Philippinen – mit einem portablen Roboter errichtet (vgl. ebd.). Auch wenn das Hauptanwendungsfeld des 3D-Drucks vorerst im Wohnungsbau liegt, gibt es schon erste Pläne für die Errichtung eines Hochhauses mit additiver Fertigung (vgl. Schach et al. 2017, S. 360; Ravencroft 2017, o. S.).

Die Herstellung eher kleinformatiger Betonbauteile, z. B. von Wandelementen, Rohren, Dekor- oder Kunstobjekten, spielt sich aktuell in Größenordnungen zwischen 50 cm und 5,00 m ab (vgl. Wieckhorst 2017, S. 6). Für großformatige Elemente bzw. das monolithische Fertigen vor Ort müssen hingegen noch komplexe und aufwendige Konstruktionen vorgesehen werden. Die chinesische Firma *Winsun* verwendet bspw. für den Druck von Häusern einen 6,60 m hohen und bis zu 150 m breiten 3D-Drucker (ebd.). Die Gebäude, die dabei entstehen, sind so hoch wie der 3D-Drucker selbst. Auch das an der *Technischen Universität Dresden* entwickelte und auf dem Contour Crafting basierende Verfahren des *CONPrint3D* kann mit entsprechenden gerüstfixierten Robotern auf Schienensystemen umgesetzt werden. Unter Laborbedingungen gelang der TU Dresden damit der Machbarkeitsnachweis für eine mögliche Ausführung auf Baustellen (vgl. Schach et al. 2017, S. 357). Praxistaugliche Betoniersysteme sind jedoch bisher weder voll umfänglich ausgereift, noch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten in großem Maße sinnvoll einsetzbar.

⁵⁴Zu Robotern siehe auch Abschnitt 2.4.6: *Baurobotik und Drohneneinsatz auf Baustellen*.

Um großformatige Konstruktionen oder Einhausungen vor Ort umgehen zu können, wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens der TU Dresden ein Konzept mit bereits vielfach eingesetzten bzw. erprobten Baustellenfahrzeugen entwickelt (vgl. Mechtcherine & Nerella 2018a, S. 282 und S. 284). So ist es mithilfe einer modifizierten Autobetonpumpe nicht nur möglich den Aufwand zur Errichtung auf Baustellen zu verringern, auch die Arbeitsvorgänge sind bei Verwendung einer mobilen Vorrichtung immer auch flexibler gestaltbar (vgl. Schach et al. 2017, S. 359). Neben den hier dargestellten großformatigen Ansätzen zur Herstellung gedruckter Gebäude wurden bereits auch erste Lösungen unter Berücksichtigung zur Einbindung von Bewehrungen vorgenommen. Ein entsprechendes Konzept, bei dem die Vorrichtung in der Lage ist Bewehrungen zu erkennen, wurde in China entwickelt (vgl. Mechtcherine & Nerella 2018a, S. 279). Bei dem Verfahren werden zuerst Stahlmatten montiert, bevor mit einer beidseitigen Materialablage und einer am Düsenkopf versehenen Vibrationsverdichtung, der Beton Schicht für Schicht gedruckt wird (vgl. Mechtcherine & Nerella 2018a, S. 279). Um die entsprechenden Prozesse ausführen zu können, ist eine spezielle Konstruktion des Druckkopfs entwickelt worden. Er beinhaltet eine gegabelte Düse, die den Beton gleichzeitig auf beiden Seiten der Bewehrung ablegt und dabei verdichtet (vgl. ebd.). Aber auch inverse Konzepte, bei denen die Bewehrung nach dem Betondruck eingebaut wird, sind möglich. So können bei dem bereits angesprochenen Contour Crafting notwendige Bewehrungsstäbe in die Hohlräume zwischen den Konturschalen eingebaut werden. Ein Verfüllen von Zwischenräumen kann nachträglich mit Füllbeton geschehen (vgl. ebd., S. 282). Auch horizontale Bewehrungsstäbe können bei den 3D-Druckverfahren – v. a., wenn sie auf Extrusion basieren – zwischen einzelne Betonschichten gelegt werden (vgl. Mechtcherine & Nerella 2018a, S. 285; Mechtcherine & Nerella 2018b, S. 498).

Neben einer zeitlich versetzten Herstellung von Bewehrung und Schalung gibt es über den 3D-Druck von Beton hinaus bereits erste Ansätze ebenfalls Stahlbewehrungen mithilfe additiver Verfahren automatisch fertigen zu lassen. Die Idee, die hinter einer sog. *Generativen Herstellung* steckt, ist es, Armierungen jeglicher Formen durch dreidimensionale Drucktechnologien zu produzieren (vgl. Mechtcherine & Nerella 2018a, S. 285). Das Verfahren – bei dem Stahlstäbe auf Basis des Gas-Metall-Lichtbogenschweißens mit vollautomatischer, adaptiver Prozesskontrolle hergestellt werden – ist besonders für geometrisch komplexe Konfigurationen der Bewehrung sowie für die Integration von Befestigungselementen und Installationen interessant (vgl. Mechtcherine & Nerella 2018b, S. 503). Die gedruckten Stahlstäbe weisen im Vergleich zu herkömmlichen Bewehrungsstäben ca. 20 % niedrigere Werte der Streckgrenze und Zugfestigkeit auf. Im Gegensatz zur konventionellen Bewehrung zeigten sie jedoch ein ausgeprägtes Fließverhalten und eine höhere Bruchdehnung (vgl. ebd.).

Auch im Hinblick auf den Mauerwerksbau ergeben sich durch den 3D-Druck neue Möglichkeiten. So können bspw. Sonderanfertigungen von Mauerziegeln den herkömmlichen Mauerformaten zur Seite gestellt werden (vgl. Unipor 2018, o. S.). Da Serienproduktionen von entsprechenden Ziegel-Sonderlösungen i. d. R. jedoch nur selten wirtschaftlich sind, bieten sich allenfalls projektspezifische Herstellungen angepasster Mauersteine an.

Potenziale und Probleme des 3D-Beton-Drucks für Baustellen

Insbesondere beim Anfertigen kleinerer Modelle ist durch additive Fertigungsverfahren gegenwärtig ein hohes Substituierbarkeitspotenzial vorhanden (vgl. Dengler & Matthes 2018, S. 3).⁵⁵ Aber auch in der Bauindustrie wird der 3D-Druck als digitale Innovation immer interessanter (vgl. Berger 2016, S. 11; Strunge 2018, S. 84). Neben Aussagen, dass das Herstellen vollständig gedruckter Häuser noch in weiter Ferne liegt (vgl. Ravencroft 2017, o. S.; Wieckhorst 2017, S. 6), wird dem 3D-Beton-Druck ebenfalls eine Schlüsselrolle als disruptive und zukunftsweisende Technologie zugeschrieben (vgl. Winkelhake 2017, S. 66; Dengler & Matthes 2018, S. 3). Nicht nur, dass aktuelle Entwicklungen immer stärker die Ausführung auf Baustellen in den Fokus nehmen (vgl. Schach et al. 2017, S. 358), auch die mit weiteren Forschungen einhergehenden verbesserten Präzisionen lassen den 3D-Druck zukünftig stellenweise so effizient werden wie heutige Fabrikfertigungen (vgl. Chevin 2018c, o. S.). Mit Zunahme vielfältiger Variationen sind darüber hinaus auch erweiterte technologische Gestaltungsmöglichkeiten gegenüber dem aktuellen Zustand deutlich umfangreicher (vgl. Mechtcherine & Nerella 2018a, S. 282). Dies betrifft insbesondere Substituierbarkeitspotenziale im Massivbau. So wird es immer wichtiger, dass sich Unternehmen in diesem Bereich zukünftig vermehrt mit 3D-Technologien und den damit verbundenen neuen Arbeitsprozessen auseinandersetzen (vgl. Wieckhorst 2017, S. 6; Brehm 2019, S. 89). Übergeordnet werden im Rahmen der Änderungen infolge additiver Fertigungsverfahren jedoch nicht nur einzelne Arbeitsschritte ergänzt oder modifiziert, es werden vielmehr Substitutionen gesamter Herstellvorgänge mithilfe digitaler Druckvorrichtungen erfolgen. Auch wenn das bereits zuvor erwähnte und noch nicht vollumfänglich gelöste Problem zum Einbringen von Bewehrungen viele Hürden mit sich bringt, weisen die additiven Fertigungsverfahren dennoch enorme Potenziale im Hinblick auf neue Arbeitsvorgänge auf.

Da der traditionelle Betoneinbau auf Baustellen stets sehr arbeits- und zeitintensiv ist und sich mit dem hier dargestellten 3D-Beton-Druck neue Einsparpotenziale ergeben, bieten schalungsfreie Bauarbeitsprozesse im Hinblick auf eine damit verbundene erhöhte Baugeschwindigkeit erhebliche wirtschaftliche Vorteile (vgl. Schach et al. 2017, S. 355 und S. 363; Henke 2018, S. 35; Strunge 2018, S. 84). Aber nicht nur aus ökonomischen, auch aus ökologischen und kulturellen Gründen liefert die Additive Fertigung weitere vielversprechende Verbesserungsmöglichkeiten. Neben Materialeinsparungen und Abfallreduzierungen (vgl. Schach et al. 2017, S. 356; Arup 2018, o. S.; Dengler & Matthes 2018, S. 3), sind aus architektonischer Sicht durch den neuen Gestaltungsspielraum in Zukunft geometrisch komplexere Figuren und Strukturen möglich (vgl. Gausemeier & Kage 2017, S. 293; Schach et al. 2017, S. 356 und S. 358, Arup 2018, o. S.; Chevin 2018a, o. S.; Dengler & Matthes 2018, S. 3; Strunge 2018, S. 84). Auch die Genauigkeit und das Herstellen multifunktionaler Bauteile können als Vorteile der additiven Fertigung genannt werden (vgl. Arup 2018, o. S.; Henke 2018, S. 35).

⁵⁵Substituierbarkeitspotenziale werden in Abschnitt 3.2: *Automatisierungswahrscheinlichkeiten von Baustellentätigkeiten* behandelt.

Das hier aufgezeigte technologische und wirtschaftliche Potenzial des digitalen Betonbaus wurde auch im Bauwesen bereits erkannt (vgl. Mechtcherine & Nerella 2018a, S. 275). Aber nicht nur durch Effizienzsteigerungen und Kostenreduzierungen, auch durch neue architektonische Gestaltungsmöglichkeiten und Verbesserungen im Bereich der Sicherheit (vgl. Krause & Otto 2019, S. 171), wird der digitale Betonbau zukünftig eine immer größere Rolle einnehmen. Auch in Kombination mit anderen technologischen Neuentwicklungen bieten sich darüber hinaus effektive Möglichkeiten für den Einsatz der innovativen Drucktechnologie auf Baustellen. So könnte der 3D-Beton-Druck vor Ort schon bald mit portablen oder mobilen Robotern möglich sein. Beispiele dafür liefern verschiedene bewegliche Versionen von Robotern, die bereits entwickelt wurden (vgl. Wieckhorst 2017, S. 6; Zhang et al. 2018, S. 99). Während ortsfeste Roboter stets umgesetzt werden müssen, können autonom bewegliche Maschinen ohne menschliche Unterstützung 3D-Elemente an den vorgesehenen Orten drucken. Eigenständig fahrende und miteinander kommunizierende Roboter sind dabei nicht nur in der Lage, die Druckaufträge autonom auszuführen, auch können mehrere Roboter heute schon parallel ein Bauteil gemeinsam erstellen (vgl. Zhang et al. 2018, S. 98). Die für die additive Herstellung notwendigen Informationen liefert dabei bspw. ein elektronischer Datensatz, der wiederum im Hinblick auf die Methode BIM aus einem zentralen dreidimensionalen und digitalen Bauwerksmodell bestehen kann (vgl. Caviezel et al. 2017, S. 80; Gausemeier & Kage 2017, S. 292; Winkelhake 2017, S. 341; Strunge 2018, S. 84; Schach et al. 2017, S. 257; Henke 2018, S. 35). Eine Integration des 3D-Drucks in die Methode des Building Information Modeling ist somit nicht nur möglich, sondern auch äußerst wahrscheinlich (vgl. Berger 2017, S. 7; Sakin & Kiroglu 2017, S. 705 und S. 710; Mechtcherine & Nerella 2018a, S. 275).

Neben einer geringen Flexibilität beim digitalen 3D-Beton-Druck, sind es v. a. die wirtschaftlichen Aspekte, die eine zeitnahe und flächendeckende Einführung von additiven Verfahren für Serienfertigungen erschweren (vgl. Caviezel et al. 2017, S. 50). Insbesondere die immer wieder anzupassenden Baustellenbedingungen, z. B. das Aufstellen von Portalrobotern, das Vorsehen notwendiger Einhausungen, das Nachweisen ausreichender Standsicherheiten oder das Berücksichtigen komplexer Logistikprozesse lassen eine umfangreiche Implementierung in naher Zukunft nicht erwarten (vgl. Caviezel et al. 2017, S. 50; Schach et al. 2017, S. 357). Zudem sind darüber hinaus auch noch viele technische Probleme zu lösen. Nicht nur, dass der genormte Beton für die gängigen Massivbauteile gröbere Gesteinskörnungen benötigt, auch muss bei der Herstellung von Bauteilen dafür gesorgt werden, dass gleichbleibende rheologische Eigenschaften vorherrschen, damit ein konstanter Materialauftrag gewährleistet werden kann (vgl. Caviezel et al. 2017, S. 80).

2.4.6 Baurobotik und Drohneneinsatz auf Baustellen

Im vorliegenden Abschnitt finden sich relevante Neuentwicklungen des bereits sehr breit gefächerten Gebiets der Robotertechnik wieder. Die mit den vielfach noch jungen und innovativen Technologien einhergehenden Nutzungsmöglichkeiten werden nachfolgend anhand verschiedener Beispiele aufgezeigt. Nach einer einführenden Definition von Robotern und dem Aufzeigen allgemeiner Vorteile bei deren Nutzung, werden anschließend verschiedene Robotertypen vorgestellt, die insbesondere für Einsätze auf Baustellen in Frage kommen. Anknüpfend an diese einleitende Übersicht sind weiterhin Probleme benannt, die aufgrund baustellenspezifischer Besonderheiten intensivere Untersuchungen zu Implementierungen im Bauwesen erforderlich machen.⁵⁶ Bevor am Ende des Abschnitts die ebenfalls für Baustellenprozesse relevanten Drohnen angerissen werden, sind zuvor aktuell verwendete Roboter aufgeführt, die bereits im Rahmen von Tätigkeiten auf Baustellen genutzt werden.

Definition von Robotern und bereichsübergreifende Vorteile bei deren Nutzung

Der Begriff *Roboter* kam bereits in den 1920er Jahren auf und bezeichnete anfänglich eine Art *schwer arbeitender Sklaven* (vgl. Müller 2012, S. 263; Siciliano & Khatib 2016, S. 1; Jordan 2017, S. 16). Spricht man heutzutage von Robotern, so handelt es sich in der Vorstellung vieler Personen häufig um *Maschinenmenschen*, die humane Züge aufweisen (vgl. Müller 2012, S. 263). Roboter werden aber auch in vielen anderen Formen konstruiert und je nach Einsatzgebiet als *computergesteuerte Maschinen* sehr unterschiedlich aufgefasst (vgl. Cambridge 2018, o. S.). Explizite Forschungen auf dem Gebiet der Robotikwissenschaft gibt es bereits seit Mitte der 1960er Jahre (vgl. Jordan 2017, S. 125). In dem mit diesem Bereich verknüpften Themengebiet der *Robotik* werden letztendlich Verbindungen und Zusammenhänge der physischen und der digitalen Welt analysiert bzw. kombiniert (vgl. Glock 2018, S. 616). Mit Bezug zu den Tätigkeitsbereichen von Baufachhandwerkerinnen und Baufachhandwerkern können Roboter zusätzlich zu den traditionellen Aufgaben und analogen Geräten als *programmierbare Werkzeugmaschinen* aufgefasst werden, die in der Lage sind, ergänzend oder substitutiv routinierte, also sich wiederholende Tätigkeiten und Arbeitsschritte, auszuführen (vgl. Jordan 2017, S. 105 u. 226).⁵⁷

Viele der bereits heute eingesetzten Roboter besitzen neben den Möglichkeiten zur Übernahme diverser Aufgaben zusätzlich einfache, aber dennoch sehr robuste Sensoren (vgl. Saidi et al. 2016, S. 1497), mit denen sie nicht nur ihre Umgebung erkennen, sondern die sie auch zur Kommunikation untereinander verwenden können.⁵⁸ Neben einer aus wirt-

⁵⁶Die mit diesen baustellenrelevanten Aspekten verbundenen Herausforderungen werden in Abschnitt 3.3: *Soziotechnischer Wandel von Baustellen infolge Digitalisierung* und Abschnitt 3.4: *Effekte der Digitalisierung auf baustellenspezifische Besonderheiten* genauer betrachtet. Nicht behandelt werden die mit den Robotertechnologien einhergehenden Entwicklungen der *Künstlichen Intelligenz*.

⁵⁷Ersetzungen durch Roboter werden in Abschnitt 3.2: *Automatisierungswahrscheinlichkeiten von Baustellen-tätigkeiten* thematisiert.

⁵⁸Sensor-Techniken wurden in Abschnitt 2.4.3: *Digitale Datenerfassung: Laserscanning und Sensor-*

schaftlicher Sicht erhöhten Produktivität durch den Einsatz von Robotern, sind v. a. auch verbesserte Qualitäten und geringere Materialverbräuche weitere Aspekte für die Nutzung digital gesteuerter Maschinen (vgl. Saidi et al. 2016, S. 1497).

Da es sich bei Baustellentätigkeiten häufig auch um eintönige, schmutzige oder gefährliche Aufgaben handelt, bietet es sich nicht nur aus wirtschaftlichen, sondern auch aus gesundheitlichen Gründen an, diverse Vorgänge von Maschinen ausführen zu lassen (vgl. Jordan 2017, S. 16). Auch im Hinblick auf humanere Arbeitsbedingungen ist eine Verwendung von Robotern stets zu erwägen. So können Maschinen nicht nur eingesetzt werden, um körperliche Arbeiten zu reduzieren, auch ein Ausgleich körperlicher Behinderungen ist denk- und umsetzbar (vgl. Möller 2015, S. 7 und S. 10; Saidi et al. 2016, S. 1497). Ein weiterer großer Bereich, in denen Roboter zukünftig vermehrt Einsätze finden werden, sind Umgebungen, die für Menschen gesundheitsgefährdend sind (vgl. Saidi et al. 2016, S. 1497), z. B. kontaminierte Gegenden oder brennende Gebäude. Generell kann festgehalten werden, dass die Digitalisierung im Bereich der Robotik Entwicklungen hervorgebracht hat, die nach und nach auch für Baustellenarbeitsprozesse immer häufiger in Frage kommen (vgl. Chevin 2018*d*, o. S.). Verschiedene Arten entsprechender Geräte werden nachfolgend dargestellt.

Robotertypen für die Anwendung auf Baustellen

Für die verschiedenen Prozesse auf Baustellen gibt es diverse Möglichkeiten, innovative Roboter und Maschinen einzusetzen. Nachfolgend sind überblickhaft einige technologische Neuentwicklungen aufgeführt, die auch für die Erstellung von Bauwerken herangezogen werden können. Es wird dabei zwischen stationären, fahrenden, laufenden, humanoiden und bereichsabdeckenden Robotern unterschieden. Alle nachfolgend aufgeführten Typen von Robotern sind unbemannt.⁵⁹

Stationäre Einzelroboter

Als stationäre Einzelroboter (*Stand-Alone-Roboter*) werden Maschinen bezeichnet, die sich an einem festen Ort befinden, von dem aus sie operieren können. Es handelt sich bspw. um Roboter, die von einem Fixpunkt aus mithilfe mechanischer Arme verschiedenformatige Elemente an die jeweiligen vom System vorgegebenen Stellen platzieren (vgl. Bock & Linner 2015, S. 124). Entsprechende damit verbundene Prozesse können – z. B. bei immer gleichbleibenden bzw. genormten Geometrien der einzelnen Bauteile – mit dem Prinzip des Mauerns verglichen werden. So ergibt sich infolge eines sukzessiven Aufbaus nach und nach bspw. eine Wand. Als Erweiterung entsprechender Vorrichtungen existieren bereits Roboter, die mithilfe mehrerer Arme und durch Nutzung von 3D-Kameras bzw. visuellen Sensoren in der Lage sind, einen Stuhl ohne menschliches Eingreifen zusammenzubauen (vgl. Cousins 2018*d*, o. S.). Die Kameras und Sensoren des Roboters

Technologien behandelt.

⁵⁹Bemannte Baumaschinen, wie Bagger oder Kräne, werden im Rahmen des Forschungsvorhabens nicht weiter behandelt. Beispiele für Roboter im Straßen- und Erdbau können z. B. in Saidi et al. (2016, S. 1509-1511) nachgelesen werden.

erkennen dabei – unabhängig davon, wo die entsprechenden Elemente im Raum verteilt sind – eigenständig die jeweiligen Einzelteile des anzufertigenden Stuhls. Es ist geplant, entsprechende Technologie auch auf gedruckte Beton-Strukturen zu übertragen (vgl. ebd.). Selbst wenn es sich bei stationären Robotern häufig noch um vorprogrammierte Maschinen handelt, die als *Single-Task*-Varianten nur eine Operation ausführen können (vgl. Saidi et al. 2016, S. 1516), sind zukünftig weitere Entwicklungen zu erwarten, die mithilfe von Kombinationen aus Kameras, Sensoren und Greifern in der Lage sind, mehr als nur eine Aufgabe präzise und kontrolliert zu erledigen (vgl. Helm 2014, S. 23-24). Auch haben die Entwicklungen von Maschinen, die Steine aufeinander setzen können, in den letzten Jahren stetig zugenommen (vgl. Saidi et al. 2016, S. 1500).

Bodenfahrende Roboter

Ein großer Vorteil bodenfahrender Roboter liegt in der Ortsungebundenheit der Geräte. Unbemannte Bodenfahrzeuge mit Rädern oder Ketten sind in der Lage, verschiedene Stellen in einem – meist vordefinierten – Raum anzusteuern. Durch Weiterentwicklungen übergeordneter vernetzter Systeme werden sich die Bewegungsradien von Maschinen zukünftig aber nicht nur ausweiten, sondern die darin stattfindenden Abläufe werden sich unter autonomen Gesichtspunkten auch stärker verselbstständigen.⁶⁰ Transportroboter sind dann nicht mehr an vorgeschriebene Wege gebunden, sie können unabhängig von bereits definierten Pfaden ihr Ziel ansteuern und darüber hinaus ebenfalls flexibel auf Hindernisse reagieren (vgl. BMWi 2017, S. 23; Dengler & Matthes 2018, S. 2). Entsprechende Materialtransportgeräte können dann mithilfe von Laserstrahlen oder Transpondern eigene Wege ausfindig machen (vgl. Jordan 2017, S. 109). Insbesondere für Baustellen ist es überaus wichtig, dass fahrende Roboter in der Lage sind, sich den jeweils vorzufindenden Bodenverhältnisse anzupassen. Ein bereits existierendes Beispiel liefert ein Kettenfahrzeug des Unternehmens *Boston Dynamics*, das sich auf unebenem Gelände bewegen kann (vgl. Jordan 2017, S. 201; Dengler & Matthes 2018, S. 2). Für eine automatisierte Baustellen-Fortschrittskontrolle hat die kalifornische Firma *Doxel* darüber hinaus einen autonomen bodenfahrenden Roboter entwickelt, der auf selbst festgelegten Routen Daten sammelt und somit den aktuellen Ist-Zustand im Abgleich mit einem vorhandenen BIM-Modell festhalten kann (BIMplus 2018b, o. S.; Doxel 2019, o. S.). Dieser Roboter ist dabei nicht nur in der Lage über unebenes Gelände zu fahren, er kann, je nach Steigungsverhältnis, sogar Treppen überwinden.

Laufende Roboter

Den bodenfahrenden Robotern ähnlich, sind laufende Maschinen, die an vierbeinige Tiere erinnern. Diese, i. d. R. sehr beweglichen und gelenkig konstruierten Roboter, haben gegenüber Maschinen mit Rädern oder Ketten den Vorteil, dass sie über kleinere Hindernisse hinweg gehen und ggf. auch Treppen steigen können (vgl. MIT 2018, o. S.; Boston Dynamics 2019, o. S.). Beispielsweise hat das Unternehmen *Boston Dynamics* einen laufenden Roboter mit einem zusätzlich aufgesetzten Lidar-Scanner entwickelt. Mit dem sog. *Spot Mini* ist es demnach möglich, aktuelle Fortschritte auf Baustellen festzu-

⁶⁰ *Cyberphysische Systeme* werden in Abschnitt 3.3.3: *Baustellen als Cyberphysische Systeme* behandelt.

halten. Dabei ist die vierbeinige Maschine in der Lage jedes Geschoss eigenständig zu scannen, da er nicht nur einzelne Stufen, sondern auch ganze Treppenläufe überwinden kann (vgl. Boston Dynamics 2019, o. S.). Ein weiteres Beispiel stellt der Roboter *Cheetah* dar. Dieser wurde am *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) entwickelt und ist neben dem Treppensteigen ebenfalls in der Lage, unebenes Gelände mit viel Schutt und Geröll zu durchqueren (vgl. BIMplus 2018a, o. S.). Die Maschine kann sich mit bis zu 23 km/h schnell fortbewegen. Sollte sie dabei mal umfallen, kann sie sich ohne fremde Hilfe wieder von alleine aufstellen (vgl. ebd.). Die hier kurz angerissenen tierähnlichen Roboter können zukünftig nicht nur beim Einsatz auf Baustellen, z. B. beim Transport verschiedener Elemente, eingesetzt werden, auch ist es möglich, diese Maschinen in Gebiete vordringen zu lassen, die für Menschen nur schwer zu erreichen sind (vgl. MIT 2018, o. S.).

Humanoide Roboter

Einer der bekanntesten humanoiden Roboter ist ebenfalls eine Entwicklung des amerikanischen Unternehmens *Boston Dynamics*.⁶¹ Bei dem menschenähnlichen *Atlas* handelt es sich um einen 1,50 m großen Roboter, der so gelenkig ist, dass er über sehr unebenes Gelände laufen oder auch Treppenstufen überwinden kann (vgl. Boston Dynamics 2019, o. S.). Sollte er trotz seiner hervorragenden Balancefähigkeit einmal hinfallen, ist er ebenfalls in der Lage, von alleine wieder aufzustehen (vgl. Dengler & Matthes 2018, S. 1; Boston Dynamics 2019, o. S.). Nicht nur, dass er seine Ziele von alleine erreicht, er hebt zudem noch Gegenstände hoch, die bis zu 11 kg schwer sind, so dass er als Transportmöglichkeit, z. B. auch auf Baustellen, genutzt werden kann. *Atlas* orientiert sich im Rahmen seiner Aktionen mithilfe eines Lidar-Scanners an seiner Umwelt (vgl. Boston Dynamics 2019, o. S.). Im Hinblick auf Baustellenarbeitsprozesse spielen bei entsprechenden humanoiden Robotern aber nicht nur die Orientierung, sondern auch vielfältige Einsatzmöglichkeiten eine große Rolle. So ist es für die Errichtung von Bauwerken i. d. R. wenig sinnvoll, dass Roboter wie *Atlas* vollumfänglich alle baustellenrelevanten Objekte greifen können. Es existieren aber bereits Varianten, in denen entsprechende Maschinen für solche Aufgaben eingesetzt werden könnten. So wurden schon Roboter entwickelt, die speziell für Baustellentätigkeiten einsatzfähig sind. Ein Beispiel für das Anbringen von Gipskartonplatten findet sich am Ende des vorliegenden Abschnitts.

Stationäre bereichsabdeckende Roboter

Wie bereits zuvor beim 3D-Beton-Druck angedeutet, ist es durchaus möglich große Konstruktionen auf Baustellen zu errichten, die bspw. über Schienen oder an Gerüsten größere Flächen abdecken. Entsprechende Vorrichtungen – die prinzipiell mit den bereits existierenden Krankonzepten vergleichbar sind – werden zukünftig im Rahmen soziotechnischer Systeme nicht nur zunehmen, sondern darüber hinaus – z. B. auf Grundlage eines zentralen BIM-Modells – auch immer häufiger automatisch gesteuert werden (vgl. Chevin 2017, o. S.). Möglich sind dabei nicht nur starre Konstruktionen, auch inno-

⁶¹Weitere humanoide Roboter sind z. B. *RoboSimian* (vgl. NASA 2015, o. S.), *Pepper* und *Nao* (vgl. Softbank Robotics 2019, o. S.), *Asimo* (vgl. Honda 2019, o. S.), *Cassie* (vgl. Oregon 2019, o. S.).

vative und stellenweise sehr ausgereifte Seilsysteme stellen variable Verfahren in Form bereichsabdeckender Systeme dar. Als Beispiel sei an dieser Stelle ein Roboter erwähnt, der vorgefertigte Holzelemente aufnimmt, und diese auf Grundlage eines vorgegebenen digitalen Modells an die entsprechenden geplanten Stellen setzt. Bei diesem System handelt es sich um eine Seilkonstruktion mit der viele Bereich auf Baustellen angesteuert werden können. Auch für das Mauern von Gebäuden wurde eine entsprechendes Konzept bereits entworfen (vgl. Karl et al. 2017, S. 13-17; Karl & Spengler 2017, S. 14). Die Vorrichtung, die an der *Universität Duisburg-Essen* entstanden ist, kann mithilfe von Seilen Mauersteine an die gewünschten Stellen transportieren. Das System wird im Hinblick auf *Cyberphysische Systeme* in Abschnitt 3.3.3 nochmals aufgegriffen. Neben Seilsystemen sind jedoch auch starre Verlege-Einrichtungen für das Setzen von Mauersteinen bereits konstruiert worden (vgl. Bock & Linner 2015, S. 227). Eine weitere Variante eines bereichsabdeckenden Roboters besteht darin, dass von einer Stelle aus große Flächen von Baustellen bedient werden. Auch hier existiert ein analoges Beispiel, das bereits dargestellt wurde: die Autobetonpumpe. Das australischen Unternehmen *Fastbrick Robotics* hat dieses Konzept auf das Mauern von Häusern übertragen. Mithilfe des sog. *Hadrian X* ist es möglich, Steine von einem fixen Punkt aus an die jeweiligen Stellen zu platzieren. Auf diesen Roboter wird nachfolgend noch genauer eingegangen. Die hier angerissenen bereichsabdeckenden Roboter können, wenn sie entsprechend weiterentwickelt werden, stets als Vorstufen für *Cyberphysische Systeme* angesehen werden.⁶²

Schwierigkeiten bei der Einbindung von Robotern in Baustellenarbeitsprozesse

Die bereits in der stationären Industrie für zahlreiche Tätigkeiten eingesetzten Roboter, z. B. zum Schweißen, Montieren, Verpacken oder Transportieren (vgl. Arntz et al. 2016, S. 1), sind zukünftig auch in der Lage auf Baustellen immer häufiger unliebsame Tätigkeiten zu übernehmen (vgl. Karl 2018, o. S., MIT 2018, o. S.). Dass eine ähnliche Nutzung von Robotern innerhalb von Baustellenarbeitsprozessen noch nicht so stark verbreitet ist, hat jedoch besondere branchenspezifische Gründe, die im Rahmen des Forschungsvorhabens in Abschnitt 3.4 behandelt werden. Nachfolgend werden diesbezüglich einige Aspekte, die sich explizit auf den Einsatz von Robotern beziehen, aufgegriffen.

Eingeschränkte Bewegungsfreiheit

Der aktuelle Forschungsstand zeigt, dass Maschinen, die v. a. viele verschiedene Tätigkeitsfelder und Aufgabenbereiche abdecken sollen, für die komplexen Abläufe auf Baustellen, noch nicht eingesetzt werden können (vgl. Saidi et al. 2016, S. 1500). Unabhängig, ob es sich bei Robotern um stationäre Maschinen oder Humanoiden handelt, stets sind projektspezifische Bedingungen zu berücksichtigen. Wenn bspw. Roboterentwicklungen in unvorhersehbaren oder komplexen Situationen zwar größere Mobilitäten aufweisen, können sie in vielen Fällen häufig nicht für präzisere oder feinmotorischere Konstruktionsprozesse herangezogen werden (vgl. Jordan 2017, S. 252). Je nach Rahmenbedingungen vor Ort müssen sich Roboter nicht nur so bewegen können, dass sie in

⁶² *Cyberphysische Systeme* werden in Abschnitt 3.3.3 erläutert.

der Lage sind ihre geforderten Aufgaben umzusetzen (vgl. Jordan 2017, S. 110; Brehm 2019, S. 90), sie sollten darüber hinaus auch noch die für sie relevanten Arbeitsplätze uneingeschränkt erreichen und ungehindert nutzen können. So ist es erforderlich, dass Roboter sich trotz vielen Hindernissen auf Baustellen frei bewegen können. Dazu gehört auch das Passieren von Gegenständen oder das Wahrnehmen bzw. Erkennen von Facharbeiterinnen und Facharbeitern (vgl. Karl 2018, o. S.; Brehm 2019, S. 90). Roboter, die sich an ihrem Ausführungsort weder drehen, noch wenden oder selbstständig die notwendigen Arbeitsbereiche erreichen können, sind auf Baustellen somit nur bedingt einsatzfähig. Eine notwendige Flexibilität geht darüber hinaus nicht nur in Bezug auf eine ausreichende Bewegungsfreiheit einher, sondern muss stets auch im Hinblick auf das Heben und Nutzen großer oder schwerer Bauteile berücksichtigt werden (vgl. Saidi et al. 2016, S. 1500).

Diversität komplexer Aufgaben

Bei vielen aktuellen Maschinen handelt es sich in erster Linie noch um die bereits zuvor erwähnten *Single-Task-Roboter*, die programmiert wurden um einzelne Aufgaben zu erledigen (vgl. Saidi et al. 2016, S. 1497). Da auf Baustellen jedoch an vielen Stellen komplexe und stets unterschiedliche Tätigkeiten zu erledigen sind (vgl. ebd.), bieten sich für viele Fälle *Multi-Task-Roboter* an, die bspw. vermessen, bohren und Steckdosen einsetzen können (vgl. Karl 2018, o. S.). Auch wenn bereits Roboter existieren, die viele verschiedene Operationen durchführen können (vgl. Saidi et al. 2016, S. 1497), stellen die stets projektspezifischen Anforderungen auf Baustellen ebenfalls hohe Anforderungen an die entsprechenden damit verknüpften Entwicklungen von Robotern.

Uneinheitliche Mobilitätsanforderungen

Wie bereits angedeutet, sind an die Mobilität von Robotern innerhalb von Baustellenprozessen besondere Anforderungen gestellt, damit die entsprechenden Umgebungen erreicht und die Arbeitsaufgaben durchgeführt werden können. Da Roboter jedoch für ihre Positionswechsel nicht nur auf bereits hergestellten Betonflächen, sondern ggf. auch auf unbefestigten Baustraßen und im Gelände fahren oder Treppen steigen müssen (vgl. Poppy et al. 1995, S. 93; Karl 2018, o. S.), sind topographische Gegebenheiten stets zu berücksichtigen. Auch Transporte durch enge Treppenhäuser oder kleinere Räume sind ebenfalls relevant (vgl. Brehm 2019, S. 90). Maschinen auf entsprechende variable Verhältnisse zu programmieren ist diesbezüglich nicht nur von Programmiererseite sehr aufwendig und schwierig (vgl. Jordan 2017, S. 251-252), auch können sämtliche Gegebenheiten auf den stets unterschiedlichen Baustellen nie voll und ganz eingeplant werden. So ist i. d. R. bereits im Vorfeld zu entscheiden, ob Roboter bspw. mit Rädern, Ketten, Beinen oder ggf. aus Kombinationen von diesen Möglichkeiten konstruiert werden müssen (vgl. ebd., S. 110). Ebenfalls zu berücksichtigen sind ausreichende Energieversorgungen und mögliche Instandhaltungen (vgl. Poppy et al. 1995, S. 93).

Raue Expositionsbedingungen (Wetter, Schmutz)

Da Prozesse auf Baustellen überwiegend im Freien stattfinden, sind die damit einhergehenden und häufig wechselnden Witterungs- und Klimabedingungen, z. B. aufgrund von Regen oder Schnee, bei einer vollumfänglichen Verwendung von Robotern stets zu berücksichtigen (vgl. Poppy et al. 1995, S. 93; Jordan 2017, S. 114; Brehm 2019, S. 90). Auch die hohen Schmutz- und Staubbelastungen vor Ort sind bereits bei Entwicklungen von Baustellen-Robotern mit einzubeziehen (vgl. Poppy et al. 1995, S. 93; Karl 2018, o. S.). Einen zuverlässigen, widerstandsfähigen und stabilen Roboter zu bauen, der gegen Staub, Schlamm, Kälte oder auch Hitze resistent ist, stellt Entwicklerinnen und Entwickler stets vor große Herausforderungen (vgl. Jordan 2017, S. 110 und S. 250).

Adaptierbare Umgebungswahrnehmungen (Erkennen, Greifen)

Grenzen bei der Automatisierung von Prozessen auf Baustellen werden ebenfalls schnell deutlich, wenn es darum geht, Gegenstände zu erkennen und diese zielgerichtet von Maschinen greifen zu lassen (vgl. Schlick et al. 2018, S. 187). Auch wenn Sensoren und Scanner – wie am Beispiel zum Zusammensetzen der Holzelemente bereits angedeutet wurde – weit entwickelt, und auch schon in vielen Robotern eingebaut sind (vgl. Frey & Osborne 2016, S. 260; Jordan 2017, S. 114; Saidi et al. 2016, S. 1497; Cousins 2018*d*, o. S.), stellen sich bei komplexen Aufgaben, z. B. beim Zusammenführen von Elementen mit mehrteiligen Verbindungen, noch viele Probleme ein (vgl. Saidi et al. 2016, S. 1500; Jordan 2017, S. 116-117). Die Wahrnehmung von Robotern ist bei entsprechenden Vorgängen nicht nur im Hinblick auf die eigentliche Herstellung von Bauwerken und den damit einhergehenden Schwierigkeiten, z. B. durch Sonneneinstrahlung oder Dunkelheit, sondern auch bzgl. der Sicherheit auf Baustellen, stets zu berücksichtigen (vgl. Jordan 2017, S. 114; Chevin 2018*d*, o. S.).

Interaktion mit Baufacharbeiter/-innen

Auch wenn die im vorliegenden Abschnitt dargestellten Roboter zur Unterstützung bei verschiedenen Vorgängen und Tätigkeiten schon vielfältig genutzt werden können (vgl. Bock & Linner 2015, S. xxii), sind diesbezüglich immer auch sicherheitsrelevante Aspekte zu berücksichtigen. Was bei stationären Interaktionen von Menschen und Maschinen durch vordefinierte Bereiche vorgenommen und abgesichert werden kann, ist auf Baustellen durch die vielfältigen interaktiven und gewerkeübergreifenden Prozesse erheblich schwerer. So stellt bspw. die zuvor erwähnte Wahrnehmung von Robotern im Hinblick auf die sich ständig bewegenden Fachkräfte große Herausforderungen dar (vgl. Chevin 2018*d*, o. S.). Um einen sicheren Betrieb auf Baustellen zu gewährleisten, ist es überaus wichtig, die Unversehrtheit des Baustellenpersonals stets in die jeweiligen Konzepte mit einzubeziehen. So besteht bspw. eine Möglichkeit darin, Roboter abrupt zu stoppen, sobald Personen in ihre unmittelbare Nähe gelangen (vgl. Saidi et al. 2016, S. 1497; Brehm 2019, S. 90). Die hier angedeuteten Aspekte der Mensch-Maschine-Interaktion werden in Abschnitt 3.3.2 noch ausführlicher behandelt.

Bereits entwickelte Roboter für Baustellen

Es existieren bereits unterschiedliche Entwicklungen von Baurobotern, die für diverse Prozesse auf Baustellen – meist gewerkebezogen – eingesetzt werden können. Viele dieser Maschinen sind für Vorgänge aus Bereichen des Innenausbaus einsetzbar. Aber auch für das Arbeiten unter freiem Himmel sind Maschinen vorhanden, die bspw. bei der Herstellung von Massivbauten herangezogen werden können. So existieren für das Errichten von Mauerwerkskonstruktionen bereits entsprechende Roboter. Ein Beispiel für einen solchen Mauerwerksroboter ist der sog. *SAM 100* einer amerikanischen Herstellerfirma (vgl. Construction Robotics 2019, o. S.). Es handelt sich bei dieser Entwicklung jedoch noch um ein halbautomatisiertes Robotersystem, bei dem Maurerinnen und Maurer nach wie vor benötigt werden, da sie nicht nur verantwortlich für die Erstellung von Kimmschichten bzw. das Hochziehen von Ecken sind, sondern auch für das Ab- bzw. Nachziehen von Fugen (vgl. Brehm 2019, S. 90; Construction Robotics 2019, o. S.). Bei Einsätzen des *SAM 100* existiert demnach noch eine stark geteilte Mensch-Maschine-Interaktion.⁶³ Der Roboter ist zwar in der Lage, große Wandflächen mit nur wenigen menschlichen Eingriffen herzustellen, für baukonstruktiv komplexe bzw. nicht repetitiv ausführbare Tätigkeiten sind jedoch stets Baufachkräfte erforderlich. Die Aufgaben der Person vor Ort spiegeln sich im Rahmen der geteilten Prozesse in erster Linie durch das Einrichten der Geschossdecke und des Roboters, in der Überwachung und Beseitigung eventueller Störungen sowie in der manuellen Ergänzung der Mauerwerksarbeiten wider. Über das reine Setzen von Mauersteinen hinaus existieren jedoch schon viele Maschinen, die bereits heute in der Lage sind, verschiedene Nebenprozesse des Mauerns eigenständig auszuführen. So können innovative Mauerwerksroboter bspw. ohne menschliche Hilfe Fugenkleber aufbringen, überstehenden Mörtel entfernen oder aber auch Mauersteine eigenständig von nebenstehenden Paletten greifen (vgl. Helm 2014, S. 98; Elashry & Glynn 2014, S. 60; Saidi et al. 2016, S. 1505-1506). Auch sind bereits verschiedene Arten von Mauerwerkskonstruktionen möglich, z. B. als L-förmige Strukturen (vgl. Bock & Linner 2015, S. 190-191). Dies ist im Vergleich zum zuvor genannten *SAM 100* – der sich lediglich auf einer eindimensionalen Vorrichtung bewegen kann – bzw. im Hinblick auf die Erstellung gesamter Häuser äußerst wichtig, da ohne die Errichtung von Mauerwerkecken nur Teilbereiche, wie z. B. Vorsatzschalen, erstellt werden könnten. Ebenfalls sind portable Maschinen in der Lage, verschiedene Muster von Mauerwerkskonstruktionen zu errichten (vgl. Helm 2014, S. 24; Bock & Linner 2015, S. 194 und S. 213; Dörfler et al. 2016, S. 216; Saidi et al. 2016, S. 1505-1506; Claypool et al. 2019, S. 31). Die meistern dieser Maschinen ermöglichen jedoch mithilfe einfacher Benutzerschnittstellen ein interaktives Eingreifen bzw. Modifizieren der Roboter (vgl. Poppy et al. 1995, S. 95; Saidi et al. 2016, S. 1506).

Viele der bereits existierenden Roboter sind darüber hinaus schon seit den 1990er Jahren in der Lage, auf computergenerierte bzw. dreidimensionale CAD-Modelle zurückzugreifen (vgl. Poppy et al. 1995, S. 95; Saidi et al. 2016, S. 1506). Dies wird – wie zuvor in Kapitel 2.3 erläutert – im Hinblick auf die Verwendung zentraler Bauwerks-

⁶³ Aspekte der Mensch-Maschine-Interaktion werden in Abschnitt 3.3.2 behandelt.

Informationsmodelle in Zukunft vermehrt zunehmen. So nutzt bspw. auch der vom australischen Unternehmen *Fastbrick Robotics* entwickelte mobile und vollautomatische Roboter *Hadrian X* entsprechende computergenerierte BIM-Modelle als Grundlage für die Errichtung ganzer Häuser (vgl. Berger 2016, S. 10-11; Glock 2018, S. 619; Hafner & Berlack 2018, S. 53; Ramge 2018, S. 72; Fastbrick 2019, o. S.). Mithilfe dreidimensionaler und zusätzlich semantischer Informationen ist der aus einem Lkw und einem 30 m langen Ausleger bestehende Roboter in der Lage einen Rohbau innerhalb von 48 Stunden zu errichten (vgl. Berger 2016, S. 10-11; Hafner & Berlack 2018, S. 53; Ramge 2018, S. 72; Brehm 2019, S. 91). Dabei arbeitet der *Hadrian X* – der für den Verbund zwischen den einzelnen Steinen einen schnell erhärtenden Kleber verwendet – nicht nur effektiver, sondern auch präziser als Fachkräfte aus dem Maurerhandwerk (vgl. Ramge 2018, S. 72; Brehm 2019, S. 91). Das Prinzip des *Hadrian X* ist damit nicht nur aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten, sondern auch hinsichtlich des Ziels, qualitativ hochwertig Bauwerke zu errichten, sehr vielversprechend. Diesbezüglich hat das Unternehmen *Fastbrick Robotics* bereits seit September 2018 eine zukunftsweisende Partnerschaft mit der *Wienerberger AG* vereinbart, um robotergesteuerte Verarbeitungen von Mauerziegeln weiter zu erforschen (vgl. Scheuch 2018, o. S.; Brehm 2019, S. 91). Der *Hadrian X* kann ebenfalls als ein sehr weit entwickeltes *Cyberphysisches System* angesehen werden, deren Aspekte in Abschnitt 3.3.3 noch genauer behandelt werden.⁶⁴

Neben den Entwicklungen für das Herstellen von Mauerwerkskonstruktionen sind ebenfalls Roboter für Arbeiten im Stahlbetonbau konstruiert worden. Für die Bewehrungsverlegung langer Stabstähle bzw. großflächiger Stahlmatten kommen auf den meisten Baustellen vielfach Baukräne zum Einsatz, da sie die Arbeitsprozesse im Rahmen von Bewehrungsverlegungen unterstützen bzw. erleichtern (vgl. Saidi et al. 2016, S. 1504). Eine Weiterentwicklung entsprechender ferngesteuerter Verfahren zur Anbringung von Bewehrungen stellt der sog. *TyBot* des amerikanischen Unternehmens *Advanced Construction Robotics* dar (vgl. Tybot 2018, o. S.). Es handelt sich bei der entwickelten Maschine um eine Vorrichtung, die über eine herzustellende Fläche, z. B. die Fahrbahn einer Brücke fährt, um nach und nach die orthogonal verlegten Stabstähle zusammenzurödeln. Der Roboter erkennt im Rahmen seiner autonomen Navigation dabei selbstständig die Bereiche, an denen die Armierungen miteinander verbunden werden müssen (vgl. BIMplus 2017a, o. S.; Tybot 2018, o. S.).

Beim sog. *Mesh Mould*-Verfahren der *ETH Zürich*, bei dem im Gegensatz zum *TyBot* menschliche Eingriffe auf ein Minimum reduziert werden können, kriecht ein zwei Meter großer und auf Raupen befestigter Roboter automatisch in einer sich ständig ändernden Umgebung ein räumliches Netz durch Ziehen, Biegen, Schneiden und Schweißen von Stahldrähten (vgl. ETH 2017, S. 2; Buchli et al. 2018, S. 71; Mechtcherine & Nerella 2018b, S. 500). Ein Stahldrähtgitter kann mithilfe des sog. *In-Situ-Fabricators* hergestellt

⁶⁴Weitere Beispiele für Mauerwerksroboter können Poppy et al. (1995, S. 95), Helm (2014), (Bock & Linner 2015, S. 191-198), Saidi et al. (2016, S. 1501-1503) oder Brehm (2019, S. 87-94) entnommen werden.

werden. Ein solches Gitter dient dabei sowohl als Schalung, als auch als Bewehrung für den Beton. Dank der engmaschigen Struktur des Stahldrahtgitters und speziellen Betonmischungen bleibt der Beton innerhalb der hergestellten Konstruktion und fließt nicht heraus (vgl. ETH 2017, S. 2; Mechtcherine & Nerella 2018b, S. 501).

Bereits 1979 haben japanische Unternehmen begonnen, grundlegende Robotertechnologien für Betonierarbeiten zu entwickeln (vgl. Poppy et al. 1995, S. 98). Mittlerweile konnte auf diesen Vorarbeiten fast jeder Aspekt der Betonverarbeitung auf Baustellen – von der Verteilung bis zur Oberflächenbearbeitung – erfolgreich automatisiert werden. Dies kann bspw. durch den bei großen Bodenplatten zur Anwendung kommenden Einsatz von maschinengesteuerten Betonglätttern belegt werden.⁶⁵ Auch die bereits zuvor erwähnte Autobetonpumpe kommt heutzutage – v. a. bei größeren Bauvorhaben – regelmäßig als unterstützende Maßnahme zum Einsatz (vgl. Saidi et al. 2016, S. 1505). Zur Betonverarbeitung können aber ebenfalls auch andere betonaufbringende Maschinen herangezogen werden. Spritzbeton-Roboter helfen bspw. dabei vertikale – i. d. R. ohne zusätzliche Schalungen und analog zur Aufbringung von Putzen vergleichbare – Betonflächen zu erstellen (vgl. ebd.). Auch sei angemerkt, dass Maschinen, die v. a. zur Herstellung horizontaler Betonbauteile, wie bspw. Bodenplatten oder Decken, ebenfalls bereits im Rahmen von Betoniervorgängen eingesetzt werden. So helfen Roboter u. a. bei einer Verteilung des eingebrachten Betons. Der mobile Betonverteilungsroboter der Firma *Tokyu* ist dabei mithilfe seiner Bereifung sogar in der Lage, große Flächen zu verarbeiten (vgl. ebd.). Ein weiterer Roboter zur horizontalen Betonverteilung ist der *Horizontal Concrete Distributor*. Der Schlauch einer Betonpumpe bewegt sich bei dieser Maschine an einem 20 m langen, viergliedrigen horizontalen Arm, der computergesteuert über die zu betonierende Fläche wandert. Hindernisse wie Stützen, Wände können dabei automatisch erkannt und umfahren werden (vgl. Poppy et al. 1995, S. 98; Saidi et al. 2016, S. 1505).

Wie bereits zuvor erwähnt, finden Robotereinsätze vermehrt im Bereich von Ausbauarbeiten statt. Mithilfe einer portabel einsetzbaren Vorrichtung können bspw. nicht-tragende Wände mithilfe des Roboters *LH 150* des Unternehmens *Komatsu* maschinell errichtet werden (vgl. Saidi et al. 2016, S. 1507). Vorgefertigte Platten werden im Rahmen automatischer Prozesse an den geplanten Stellen mithilfe dieser selbstfahrenden Maschine angebracht. Eine Weiterentwicklung entsprechender Maschinen zur Montage großflächiger Elemente stellt der humanoide Roboter *HRP-5P* des *National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)* dar (vgl. AIST 2018, o. S.). Dieser 1,80 m große und 100 kg schwere Roboter ist nicht nur in der Lage, seine Umgebung zu erkennen, er kann darüber hinaus auch die für ihn notwendigen Objekte mithilfe von Sensoren identifizieren (vgl. LAZ 2018, o. S.). Bei diesen autonom durchgeführten Vorgängen nimmt er Gipskartonplatten eigenständig auf, transportiert sie an die vorgesehene Stelle und schraubt sie zudem mit einer dafür eingebauten Vorrichtung an die Ständer-

⁶⁵Entsprechende Roboter, z. B. der sog. *Surf Robo*, können u. a. Poppy et al. (1995), Helm (2014, S. 31-32) oder Saidi et al. (2016) entnommen werden.

konstruktionen (vgl. ebd.). Wesentliche Vorteile entsprechender Roboter beim Einsatz im Innenausbau sind einerseits die ebenen Flächen, auf denen sich die Maschinen bewegen können, sowie der Wetterschutz, der durch bereits hergestellte Decken und Dächer stets trockene Arbeitsumgebungen schafft. Weitere Roboter für den Ausbau sind Entwicklungen, die bspw. Glasfassadenelemente von der Innenseite eines Gebäudes anbringen können (vgl. Saidi et al. 2016, S. 1508-1510; Chevin 2018*d*, o. S.). Auch zum Verlegen von Fliesen, zum Streichen von Wänden sowie zum Beschichten von Bauteilen oder für das Erstellen temporärer Konstruktionen können entsprechende Roboter verwendet werden (vgl. Saidi et al. 2016, S. 1507-1510). So entwickelte das Unternehmen *Kewazo* bspw. ein System, das Gerüstbauteile mithilfe eines automatischen Gerüsttransports kosteneffizient transportiert (vgl. Kewazo 2018, o. S.).

Drohneinsatz auf Baustellen

Drohnen erscheinen für die Errichtung von Bauwerken vordergründig nicht von großer Bedeutung zu sein. Neueste Entwicklungen zeigen jedoch, dass auch unbemannten Fluggeräte immer zunehmender in den Fokus für die Verwendung auf Baustellen rücken (vgl. Berger 2016, S. 10; Metz 2017, S. 50; Amos 2018, o. S.).⁶⁶ Bisher liegen die Nutzungsmöglichkeiten jedoch eher auf der planerischen Seite. So können Drohnen durch das Überfliegen großflächiger Bereiche mithilfe zusätzlicher Kamera- oder Laservorrichtungen topographische Vermessungsdaten generieren (vgl. Berger 2016, S. 10; Metz 2017, S. 49; Amos 2018, o. S.; Behaneck 2018*b*, S. 46; Li et al. 2018, S. 275; Mikeleit 2018, S. 36; Range 2018, S. 72). Die damit erzeugten Informationen sind im Vergleich zu traditionellen Messverfahren nicht nur schneller erzeugt, sondern auch viel präziser und exakter (vgl. Metz 2017, S. 49; Range 2018, S. 72). So entstandene Datenerhebungen und Bildaufnahmen (vgl. Metz 2017, S. 50; Holst 2018, S. 700; Li et al. 2018, S. 275; Mikeleit 2018, S. 38) können neben der damit verknüpften Generierung von Informationen auch für Baufortschrittskontrollen oder Überwachungsprozesse herangezogen werden (vgl. Berger 2016, S. 10; Li et al. 2018, S. 275). Eine Verknüpfung der ständig aktualisierten Daten mit einem BIM-Modell ist diesbezüglich in Zukunft sehr wahrscheinlich (vgl. Berger 2017, S. 7). Auch sind Drohnen für unterschiedliche Einsätze im Bereich von Inspektionen mehr als sinnvoll (vgl. Metz 2017, S. 50; Amos 2018, o. S.; Behaneck 2018*b*, S. 46; Li et al. 2018, S. 275). So können im Rahmen von Prüfungen bspw. nicht nur Beschichtungsdicken oder Bewehrungstiefen gemessen werden (Metz 2017, S. 50), auch sind Thermografieaufnahmen oder Energieverlustmessungen durch Kombinationen mit Scannern und Kameras stets denkbar (vgl. Berger 2016, S. 10; Metz 2017, S. 50; Amos 2018, o. S.; Holst 2018, S.700; Mikeleit 2018, S. 38). Dies gilt insbesondere auch für Untersuchungen von schwer zugänglichen Bereichen (vgl. Metz 2017, S. 49; Mikeleit 2018, S. 36).

⁶⁶International werden unbemannte Fluggeräte als *Unmanned Aerial Vehicles (UAV)* bezeichnet. Entsprechende Definitionen können in folgenden Quellen nachgelesen werden: Holst 2018, S. 700; Li et al. 2018, S. 275; Winkelhake 2017, S. 76.

Aber nicht nur für Prozesse, die im Rahmen der Planung und Überprüfung von Bauwerken relevant sind, können zukünftig Drohnen eingesetzt werden. Durch die Nutzung flexibler Routen, die mit dem Einsatz entsprechender Fluggeräte einhergehen, stellen sich insbesondere auch für Abläufe auf Baustellen transportlogistische Vorteile dar (vgl. Brzeski & Burk 2015, S. 1; Winkelhake 2017, S. 76). Neben möglichen Transporten bzw. Lieferungen sind darüber hinaus ebenfalls Vorgänge möglich, die bei der Errichtung von Bauwerken herangezogen werden könnten. So wurden bereits erste Versuche unternommen, bei denen mithilfe von Drohnen kleinformatige Steine aufeinandergesetzt werden können (vgl. Brell-Cokcan & Braumann 2013, S. 18).

3 Auswirkungen der Digitalisierung auf Baustellenarbeitsprozesse

3.1 Relevante Einflüsse der Digitalisierung auf Baustellenarbeitsprozesse

3.1.1 Veränderungen der Bauausführung infolge Digitalisierung

Mit den Implementierungen der im vorherigen Kapitel dargestellten digitalen Innovationen werden nicht nur ganze Arbeitsabläufe grundlegend umgestaltet, auch entstehen im Zuge der damit einhergehenden Anpassungen stellenweise so starke Veränderungen von Prozessen, dass die darin stattfindenden Tätigkeiten bereits heute in vielen Bereichen ersetzt werden können. Nachfolgend sind vier Phänomene aufgeführt, die mit den Einbindungen digitaler Arbeits- und Hilfsmittel einhergehen. Neben neu zu betrachtenden bauleistungsprozessen zählen dazu ebenfalls grundlegende Aspekte der Informatisierung, neue Rollenbezeichnungen sowie damit verbundene Fachtermini und auch veränderte Sicht- und Arbeitsweisen hinsichtlich Baudokumentationen.

Neues Logistik- und Prozessverständnis

Neben der detaillierten Organisation und Koordination von Ressourcen, Arbeitsabläufen oder Ausrüstungen, zählen insbesondere Material- und Einsatzplanungen auf Baustellen zu den wesentlichen Aspekten der Bauleistungslogistik (vgl. Blockley 2005, S. 274). Die häufig sehr komplexen Prozesse können zukünftig im Rahmen der Digitalisierung aufgrund der bereits dargestellten neuen technischen Möglichkeiten angepasst und unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten optimiert werden. Aufgrund der sich stets ändernden Arbeitsbedingungen auf Baustellen müssen jedoch aus logistischer Sicht immer neue projektspezifische Konzepte entwickelt werden (vgl. Helmus 2009, S. 27). So sind bspw. nicht nur Baubeteiligte und Materialien, sondern stets auch die örtlichen Gegebenheiten zueinander ins Verhältnis zu setzen (vgl. Helmus 2009, S. 28 u. S. 32; Mättig et al. 2018, S. 65). Auch bei Berücksichtigung aller projektspezifischen bzw. rahmengebenden Fakten kommen zentral koordinierte Steuerungen im Bauwesen bisher i. d. R. nicht vor (vgl. Jehle et al. 2013, S. 23).

Mithilfe objektbasierter zentraler Verwaltungen und durchgängiger Koordinationen bei Nutzung dreidimensionaler BIM-Modelle, können Prozesse der Baustellenlogistik und auch die damit verknüpften Arbeitsabläufe jedoch zukünftig neu betrachtet werden (vgl. Gasteiger 2015, S. 124; Hausknecht & Liebich 2016, S. 34; Scharfenberg & Wellensieck

2017, S. 126; Glock 2018, S. 617). So sind Daten und Informationen auch im Hinblick auf bauglogistische Vorgänge fortan vermehrt über offene Schnittstellen für alle Projektbeteiligten verfügbar (vgl. Glock 2018, S. 620; VDI 2552-7 2018, S. 2).

Auch die bereits in Abschnitt 2.4.4 dargestellten Auto-Identifikationstechniken sind für die logistischen Abläufe auf Baustellen von großer Bedeutung. Dies betrifft u. a. die Nachvollziehbarkeit von Bauteilen über RFID, z. B. für Schalelemente oder Werkzeuge (vgl. Jehle et al. 2013, S. 94). Durch entsprechende Vernetzungen von Bauteilen oder digitalen Arbeits- und Hilfsmitteln können baubetriebliche Prozesse zukünftig – auch unternehmens- und gewerkeübergreifend – optimiert werden (vgl. Helmus 2009, S. 72 u. S. 79; BM 2016, S. 109). So sind bspw. Lokalisierungen, Arbeitsorganisationen oder Transportanmeldungen nicht nur effektiv durchführ-, sondern ebenfalls auch stets nachvollziehbar (vgl. Helmus 2011, S. 72; Kölzer & Ranke 2014, S. 40). Insgesamt sind Lokalisierungen und Anschlusskontrollen in Zukunft intensiver in einzelnen Abläufen und Vorgängen zu berücksichtigen als es bisher auf Baustellen der Fall ist (vgl. Helmus 2009, S. 331; Kölzer & Ranke 2014, S. 40).

In Kombination mit mobilen Endgeräten können Auto-Identifikationstechniken zukünftig auch die vor Ort häufig nur sporadisch und begrenzt vorhandenen Lagerkapazitäten besser nutzen. Durch echtzeitnahes Abrufen der Verfügbarkeiten aller notwendigen Werkzeuge, Kleingeräte und Materialien, die auf Baustellen vorhanden sind, kann mithilfe entsprechender Software stets dargestellt und nachvollzogen werden, welche Geräte und Medien vorhanden sind, und welche davon z. B. bereits für andere Tätigkeiten reserviert wurden (vgl. Helmus 2009, S. 27; Helmus 2011, S. 72, S. 103 und S. 106; Wolter et al. 2015, S. 21; Arntz et al. 2016, S. 2; BM 2016, S. 109). Auch Einblendungen bauprozessrelevanter Informationen mithilfe von Augmented Reality, z. B. zum Abgleich von Stückzahlen und darauf basierenden Nachbestellungen, sind im Rahmen logistischer Vorgänge stets möglich (vgl. Mättig et al. 2018, S. 65).

Die hier angerissenen Veränderungen im Rahmen logistischer Abläufe auf Baustellen werden nachfolgend an zwei Beispielen praxisnah dargestellt. Ein erstes konkretes Beispiel ist in Jehle et al. (2013, S. 42-44) zu finden: Zur Herstellung eines Stahlbetonbauteils in einer Halle sind mithilfe von RFID-Transpondern an Bewehrungskörben, an Schalungen und an verschiedenen Einbauteilen nicht nur einzelne Lokalisierungen, sondern darüber hinaus auch Kontrollen der Zusammengehörigkeit möglich (vgl. ebd., S. 42). Im besten Falle laufen entsprechende Kompatibilitätsprüfungen – die mit den Kollisionsprüfungen im Rahmen von BIM verglichen werden können – automatisch ab. Wird bspw. die Bewehrung für das Bauteil gefertigt, erfolgt durch den Einbau der RFID-Tags zuerst ein Export der notwendigen Informationen aus der Ausführungsplanung in das entsprechende Bauteil. Während der Bewehrungsverlegung werden die Festlegungen von Anforderungen aus der Planung mit den realen Eigenschaften der Materialien, z. B. durch die Angabe abweichender Bügelabstände, ergänzt. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, weitere Informationen des Fertigungsprozesses zu hinterlegen oder zu bearbeiten. Nach der Fertigstellung des Stahlbetonbauteils wird ein Etikett, z. B. ein Bar- oder QR-

Code angebracht. Mithilfe eines Lesegerätes findet eine abschließende Synchronisation statt, mit der der aktuelle Status des Lagerortes festgelegt wird (vgl. ebd. S. 44).

Anknüpfend an das aufgeführte Beispiel von Jehle et al. (2013) kann ein weiterer praxisnaher logistischer Bauablauf nach Prüser (2016) herangezogen werden. Hierbei handelt es sich um den Einbau von Betonfertigteilen im Rahmen digitaler Prozessabläufe (vgl. ebd. S. 65-66): Ein Stahlbetonbalken, der bereits – wie im vorangegangenen Beispiel beschrieben – während der Herstellung alle notwendigen Informationen auf Grundlage eines BIM-Modells für seine weitere Verarbeitung erhalten hat, kann nach seiner Anlieferung auf der Baustelle mithilfe von mobilen Endgeräten und entsprechenden Software-Applikationen bspw. auf den für ihn vorgesehenen Lagerplatz zwischendeponiert werden. Nachdem das Fertigteil geprüft und angenommen ist, wird der Vorgang ins digitale Bautagebuch eingetragen. Dieser Schritt stellt einen wichtigen Meilenstein für die weitere Bauablaufplanung dar. Die Randbedingungen für den Einbau, wie Einbauort, Gewicht, Abmessungen etc. können jederzeit dem zentralen Modell entnommen werden. Im besten Fall melden Hebezeuge zeitnah ein Problem, wenn z. B. das Fertigteil zu schwer oder der Einbauort unerreichbar ist. Der Transport erfolgt, sobald die digital abgebildete Baustelle den Einbauort innerhalb des BIM-Modells freigegeben hat. Nach dem erfolgreichen Einbau des Fertigteils wird dieser Vorgang ebenfalls ins digitale Bautagebuch eingetragen (vgl. ebd., S. 66).

Die hier beschriebenen Veränderungen rufen nicht nur generelle Anpassungen der Baulogistik hervor, auch die mit diesen Prozessen verbundenen Arbeitsorganisationen sind dementsprechend zu modifizieren. Insbesondere durch Verwendung eines digitalen BIM-Modells, das in Kombination mit den dargestellten Auto-ID-Technologien verknüpft ist, sind zukünftig für alle Baubeteiligten entsprechende Grundkenntnisse baulogistischer Gesamtprozesse erforderlich (vgl. Forbau 2012, S. 8; Prüser 2016, S. 69; Nagl et al. 2017, S. 1; Syben 2017, S. 20). Die mit den hier dargestellten Aspekten stark verknüpften Informatisierungsprozesse werden nachfolgend noch genauer betrachtet.

Veränderte Arbeitsweisen durch neue Informatisierungsprozesse

Auch bei der Informationsbeschaffung notwendiger Ausführungsunterlagen spielt die Methode BIM zukünftig eine tragende Rolle. Mit ihr gehen nicht nur die bereits dargestellten Veränderungen von Prozessen, sondern auch Modifikationen der damit verknüpften Arbeitsweisen einher (vgl. Gasteiger 2015, S. 124; Hausknecht & Liebich 2016, S. 16 und 147; Karl et al. 2017, S. 23; Bernert 2018, S. 26; Glock 2018, S. 617; Wieselhuber 2018, S. 31 und S. 43). Der Stufenplan zur Berücksichtigung der Digitalisierung im Bauwesen stellt diesbezüglich – und im Hinblick auf den mit BIM einhergehenden Paradigmenwechsel – als Merkmal des modernen Bauens heraus, dass zukünftig die „geschuldeten Leistungen des Planens, Bauens und Betreibens modellbasiert erbracht und die dazugehörigen Daten in digitaler Form geliefert werden“ (Planen Bauen 4.0 2015a, S. 15) sollen. So dienen fortan immer weniger gedruckte Papierpläne als die eigentlichen Ausführungsdokumente, sondern vielmehr digitale dreidimensionale Bauwerksmodelle.

Das bereits angesprochene Prinzip einer durchgängigen, zentralen und objektbasierten Verwaltung und Koordination von Projektinformationen wirkt sich interdisziplinär auf alle Leistungsbilder – und damit auch auf die Bauausführung – aus (vgl. Tautschnig et al. 2017, S. 357). Aus einer gemeinsamen Datenumgebung werden alle Projektbeteiligten zukünftig ihre zum Zeitpunkt der Ausführung benötigten Teilinformationen exportieren und für ihre Zwecke verwenden (vgl. Schaper & Tulke 2015, S. 437).¹ Ein für diese Vorgänge notwendiges zentrales BIM-Modell kann diesbezüglich auch als *Cloud* aufgefasst werden (vgl. Berger 2017, S. 11).² Stellenweise wird – v. a. dann, wenn es darum geht Informationen aus einer entsprechenden Umgebung zu gewinnen – von *BIM to Field* gesprochen (vgl. Schaper & Tulke 2015, S. 438).

Zukünftig werden bei der Nutzung zentraler Kommunikationsplattformen anstelle von Zetteln, Telefonaten oder E-Mails vermehrt Informationen – z. B. zu speziellen Bauteilen – direkt über BIM-Modelle gewonnen (vgl. Gasteiger 2015, S. 37; Schreyer 2016, S. 50; Syben 2017, S. 20). Dies kann sowohl über mobile Endgeräte, als auch mithilfe von Gesten- und Spracherkennungen erfolgen (vgl. Bernert 2017, S. 30). Die digitalen, auf Smartphones oder Tablets dargestellten 3D-Modelle werden dabei nicht nur eine zentrale Rolle einnehmen, sie verdrängen zugleich die herkömmlichen zweidimensionalen Planungsunterlagen und schaffen mit ihren offenen und universellen Kommunikationsplattformen neue Informatisierungsvorgänge (vgl. Prüser 2016, S. 67). Diese Prozesse sind zukünftig auch für Bauunternehmen immer wichtiger (vgl. Baier & Díaz 2017, S. 32).

Für ein Abrufen von Informationen ist es zukünftig für Facharbeiterinnen und Facharbeiter nicht nur wichtig zu wissen, wie die erforderlichen Ausführungsunterlagen gewonnen werden können, sondern auch, auf welchen Wegen Daten und Informationen daraufhin im Rahmen von BIM weitergeleitet oder projektbezogen verwaltet werden müssen (vgl. Schreyer 2016, S. 50). Über ein zentral verortetes 3D-Modell ergeben sich somit Prozesse, die für alle Beteiligten in Zukunft verstärkte teamorientierte und transparente Kooperationen erfordern (vgl. Karl et al. 2017, S. 23; Glock 2018, S. 617; Wieselhuber 2018, S. 43). So werden zukünftig digitale Modelle neben Prozessen des Informationsmanagements insbesondere auch für die damit verbundenen Arbeitsschritte – die dann häufig in Echtzeit und bauteilorientiert ablaufen – Verwendung finden (vgl. Hausknecht & Liebich 2016, S. 34; Prüser 2016, S. 53; Fieldwire 2018, o. S.).

Um die zuvor in Abschnitt 2.4 aufgeführten innovativen Technologien dennoch bedienen zu können, müssen Baufachkräfte aber nicht nur die übergeordneten Zusammenhänge verstehen, sondern darüber hinaus auch entsprechende Kenntnisse aufweisen, um die jeweiligen Werkzeuge zu benutzen (vgl. Winkelhake 2017, S. 55; Bernert 2018, S. 26). Zu den digitalen Arbeitsmitteln zählen bspw. die in Abschnitt 2.4.4 genannten *RFID*-Lesegeräte (vgl. Forbau 2012, S. 8-9; Staub 2012, S. 26-29) oder die ebenfalls bereits

¹Auf das *Common Data Environment* wird nicht vertiefend eingegangen.

²Auch auf eine explizite Auseinandersetzung mit dem *Cloud-based Computing* wird im Rahmen des Forschungsvorhabens verzichtet.

aufgeführte *Augmented Reality* (vgl. Dalux 2018, o. S.). Zum Abrufen von Informationen oder zum Anzeigenlassen eines Baufortschritts ist es zusätzlich nicht nur wichtig, mit der entsprechenden Hardware umgehen zu können, sondern ebenfalls mit den dafür vorgesehenen Programmen, z. B. in Form branchenspezifischer Baustellen-Applikationen. So werden Ausführungsunterlagen im Rahmen von Building Information Modeling zukünftig fast ausschließlich mithilfe von *BIM-Viewern* abgerufen, mit diesen individuell visualisiert oder je nach Bedarf entsprechend gefiltert (vgl. Gasteiger 2015, S. 37; Herre & Pfeiffer 2015, S. 527; Bernert 2016, S. 35; Schreyer 2016, S. 37; Bernert 2017, S. 30). Neben Simulationen zum Bauablauf sind solche Filterungen für Darstellungen gewerkespezifischer Elemente, wie z. B. von Bewehrungen oder Schalelementen – etwa mithilfe von Farbcodierungen – in den dreidimensionalen Modellen stets praxisnah möglich (vgl. Schreyer 2016, S. 32 und S. 37; Baier & Díaz 2017, S. 30; Röschenkemper 2018, S. 91). Auch wenn diese Anzeigeoptionen bereits effektiv im Rahmen von Baustellenarbeitsprozessen genutzt werden können, z. B. indem mit ihnen Elemente und Attribute spezifisch darzustellen sind, ist es mithilfe von BIM-Software darüber hinaus ebenfalls möglich, zweidimensionale Pläne aus einem 3D-Modell abzuleiten (vgl. Hausknecht & Liebich 2016, S. 76; Schreyer 2016, S. 50). Zusätzlich zum Abruf der für die Bauausführung relevanten Informationen können entsprechende Programme ebenfalls für exakte Berechnung und Bestellung von Materialien sowie für Auftragsverwaltungen, Terminorganisationen oder für das Erstellen von Aufgabenlisten herangezogen werden (vgl. Christalon & Neubauer 2015, S. 508; Gasteiger 2015, S. 37; BM 2016, S. 109; HWK Erfurt 2016, S. 1; Schreyer 2016, S. 37; Dalux 2018, o. S.; Fieldwire 2018, o. S.; Craftnote 2019, o. S.). Zudem ist durch die permanente Aktualisierung der BIM-Modelle jederzeit vor Ort ein Soll-Ist-Abgleich durchführbar (vgl. Gasteiger 2015, S. 37; Craftnote 2019, o. S.).

Aber auch weitere Einblendungen, z. B. von Bedienungs- und Montageanleitungen, von Bestellungen und Lieferscheinen, von nützlichen Hinweisen oder von Erinnerungen bzw. von Adress- und Kontaktdaten, sind zukünftig auf Baustellen stets möglich (vgl. BM 2016, S. 109; Herter & Silbe 2017a, S. 114; City Hire 2018, o. S.; Röschenkemper 2018, S. 91; Craftnote 2019, o. S.). Nach dem Erhalt einer Ware können diesbezüglich ebenso projektrelevante Informationen eingespeist werden, u. a. wenn Betonlieferungen stattgefunden haben oder wenn das Eintreffen eines bestellten Bauteils – z. B. mithilfe eines RFID-Readers – bestätigt werden soll (vgl. Craftnote 2019, o. S.). Aspekte des Verbuchens von Informationen werden am Ende des Abschnitts im Hinblick auf die ebenfalls überaus relevante digitale Baudokumentation aufgegriffen.

Wie hier gezeigt, ist es zukünftig für das Herstellen von Bauteilen und Bauwerken überaus wichtig, dass der Bezug zur Informationsgewinnung – der sehr stark vom bisherigen Ablauf abweicht – von den Arbeitskräften vor Ort nicht nur theoretisch vorhanden ist, sondern dass er darüber hinaus auch projektspezifisch für die verschiedenen Bauvorhaben angewendet werden kann. Eine mit den neuen und umfangreichen Informatisierungsprozessen einhergehende mögliche Datenflut sollte dabei nicht nur präventiv von Seiten der Planung verhindert werden, sondern sie muss, v. a. wenn sie bei größeren Bauvorhaben auftritt, auch immer von den Fachkräften vor Ort bewältigbar sein (vgl. Berger 2016,

S. 13). Die hier aufgeführten Aspekte der Informatisierung werden im Zusammenhang mit der ebenfalls wichtigen Baustellenkommunikation in den Abschnitten 4.1 und 4.2 weiter behandelt.

Neue Rollenverteilungen und neues Fachvokabular

Da sich mit zunehmenden Automatisierungsprozessen bereits bestehende Kommunikationsformen und auch die damit verbundenen Verhältnisse untereinander wandeln (vgl. Hacker 2014, S. 183), sind für die verschiedenen Aufgaben im Rahmen der Einführung von BIM ebenfalls neue Zuständigkeiten erforderlich (vgl. Wieselhuber 2018, S. 9; VDI 2552-7 2018, S. 7). So ist für die Ausführenden auf Baustellen bereits eine eigene Rollenbezeichnung vorgesehen. Durch das Abrufen relevanter Informationen werden die Akteurinnen und Akteure zu *Informationsnutzer/-innen (BIM-Nutzer/-innen)*.³ Genau genommen handelt es sich bei dieser Rolle um Projektmitglieder, die das Datenmodell ausschließlich zur Informationsgewinnung nutzen und dem Bauwerksinformationsmodell keine neuen Daten oder Informationen hinzufügen (vgl. VDI 2552-2 2018, S. 4; VDI 2552-7 2018, S. 7). Als Beispiel können Ausführende genannt werden, die anhand eines abgeleiteten Schalungsplans aus einem BIM-Fachmodell eine Schalung erstellen, jedoch keine weiteren Eingaben vornehmen.

Diese Festlegungen sind jedoch aufgrund der mannigfaltigen Vorgänge und Aufgaben auf Baustellen nicht ausreichend. Im Hinblick auf neue Zuweisungen sollten v. a. die zuvor angesprochenen komplexen Informatisierungsprozesse stets berücksichtigt werden. So ist es bspw. nicht nur wichtig, dass neue Rollen definiert und vergeben werden, sondern auch, dass die Beteiligten ihre Positionen und Funktionen im Rahmen der mannigfaltigen Prozesse bzw. im Kontext projektspezifischer Zusammenhänge verstehen. Da während der Errichtung von Bauwerken häufig unvorhersehbare Schwierigkeiten auftreten, sollte somit auch das Baustellenpersonal über das reine Anwenden von Daten in der Lage sein, auf mögliche Probleme reagieren zu können. Dies betrifft in erster Linie die vor Ort arbeitenden Fachkräfte bzw. die BIM-Nutzer/-innen. Im *Technischen Positionspapier der Deutschen Bauindustrie* heißt es dazu: „Projektbeteiligte müssen das Projektziel verstehen und lernen, dies unabhängig von der Art ihrer Beteiligung zu ihrem eigenen Ziel zu machen und gemeinsam darauf hin zu wirken“ (Bauindustrie 2019, S. 14).

Mit der Automatisierung verändern sich aber nicht nur die Rollen und Zuständigkeiten, sondern auch der mit den Neuerungen verknüpfte Fachwortschatz (vgl. Hacker 2014, S. 183). Im Bauwesen wird sich dabei das entsprechende Fachvokabular infolge Digitalisierung nicht nur durch die in Abschnitt 2.4 dargestellten Technologien, wie bspw. *Augmented Reality*, *RFID* oder *Additive Fertigung* erweitern, sondern insbesondere auch durch die Methode BIM stark modifizieren. So finden neben dem eigentlichen Verständnis für die neue Arbeitsweise zukünftig ebenfalls arbeitsprozessbezogene Termini für alle

³Neben *BIM-Nutzer/-innen* existieren drei weitere Rollen innerhalb der Methode BIM: *BIM-Manager/-innen*, *BIM-Koordinator/-innen* und *BIM-Autor/-innen*. Diese werden hier nicht weiter behandelt. Nähere Informationen können VDI 2552-7 (2018, S. 7) entnommen werden.

Beteiligten immer häufiger Anwendung. Nachfolgend werden diesbezüglich vereinzelte Begriffe, die auch für die Bauausführung im Rahmen von BIM relevant sind, skizziert.⁴

Für alle Bauvorhaben, die zukünftig mit Building Information Modeling abgewickelt werden sollen, ist es grundlegend wichtig, dass zu Beginn festgehalten wird, welche Ziele zu erreichen sind. Dies geschieht im Rahmen der neuen Arbeitsweise durch die Erstellung von *BIM-Projektentwicklungsplänen (BAP)*. Diese sind aufgrund der dort aufgeführten Inhalte, z. B. in Form von Festlegungen organisatorischer Strukturen oder personenbezogener Verantwortlichkeiten, für alle Projektteilnehmerinnen und Projektteilnehmer als Vertragsbestandteil heranzuziehen (vgl. Hausknecht & Liebich 2016, S. 211). BIM-Projektentwicklungspläne bilden weiterhin die Grundlage für die auf ihnen aufbauenden Handbücher, die sog. *Information Delivery Manuals (IDM)*. Diese sind nicht nur zur Erstellung des zentralen Koordinationsmodells bzw. der einzelnen Fachmodelle relevant, sondern darüber hinaus enthalten sie auch die für die Kommunikation wichtigen Datenübergabeanforderungen. Neben projektspezifischen Prozessdefinition sind ebenfalls Auflistungen BIM-relevanter Modellelemente und Attribute in den IDMs zu finden (vgl. ebd., S. 212). Dies ist im Rahmen der zuvor angerissenen Informatisierung insbesondere für die Akteurinnen und Akteure auf Baustellen überaus relevant. Auch können Objektinformationen, z. B. Typenbezeichnungen, Herstellerangaben oder Materialeigenschaften, im Rahmen von BIM zukünftig nur mithilfe zuvor festgelegter *Model View Definitionen (MVD)* effektiv vor Ort ausgelesen werden (vgl. ebd., S. 214). Die MVDs sind eine Teilmenge des übergeordneten herstellerneutralen Austauschformats *Industry Foundation Classes (IFC)*, das im Rahmen des *Common Data Environments (CDE)* die Grundlage für sämtliche Datenaustausch-Szenarien bildet und bereits in der Norm DIN EN ISO 16739 (2017) festgelegt wurde. Neben dem IFC-Datenformat – das weniger im Rahmen der Prozesse auf Baustellen, sondern vielmehr in den Planungsphasen Anwendung findet – bildet das *BIM Collaboration Format (BCF)* eine wichtige Grundlage für die Kommunikationsprozesse (vgl. ebd., S. 210). Mithilfe dieses Austauschformats sollen künftig alle Projektbeteiligten über die zentralen Informationsmodelle miteinander in Verbindung treten. Das Aufzeigen der hier kurz angerissenen Fachwörter – die bei der Verwendung der Methode BIM unumgänglich sind – macht deutlich, dass eine Auseinandersetzung mit den Aspekten der Fachsprache im Bauwesen auch für Beteiligte auf Baustellen dringend erforderlich ist (vgl. Beetz 2015, S. 167).

Digitale Baudokumentationen in Echtzeit

Auch im digitalen Zeitalter nutzen viele Handwerkerinnen und Handwerker bei der Erfassung von Aufmaßen, Kunden- und Auftragsdaten noch Zettel oder Formblätter. So werden u. a. Arbeitszeiten auf Notizzetteln dokumentiert oder Rechnungen auf Papier ausgedruckt (vgl. BM 2016, S. 109). Insbesondere durch die Anwendung mobiler Endgeräte können diese Vorgänge zukünftig im Rahmen von BIM verstärkt digitalisiert

⁴Die hier aufgeführten Kurzerläuterungen wurden dem Glossar in Hausknecht & Liebich (2016, S. 209-215) entnommen. Für eine genauere Übersicht BIM-relevanter Fachwörter sei an dieser Stelle auf die Richtlinie VDI 2552-2 (2018) verwiesen.

und im Hinblick auf eine nachvollziehbare Dokumentation ebenfalls lückenlos ausgeführt werden (vgl. Christalon & Neubauer 2015, S. 508; BM 2016, S. 109; Schreyer 2016, S. 66; Herter & Silbe 2017a, S. 110 und S. 116; Craftnote 2019, o. S.). Mit direkten Bezügen zum Bauvorhaben lassen sich bspw. die traditionellen Monats- oder Wochenberichte komplett durch Echtzeitangaben ersetzen (vgl. Schreyer 2016, S. 66). Neben entsprechenden aufwandsmindernden Möglichkeiten können ebenfalls digitale Aufmaße (vgl. BM 2016, S. 109; Blödorn 2017, S. 32), Behinderungs- und Mängelanzeigen oder Abnahmeprotokolle – z. B. in Kombination mit Kommentaren, Fotos oder Sprachmemos – eingespeist werden (vgl. Forbau 2012, S. 9; Herter & Silbe 2017a, S. 114; Dalux 2018, o. S.; Sander 2018, S. 35; Craftnote 2019, o. S.; Haghsheno et al. 2019, S. 53). Auch Arbeitszeiterfassungen, Bautagesberichte oder Baufortschritts- bzw. Qualitätskontrollen sind im Hinblick auf eine BIM-konforme Dokumentation aus Sicht der Bauausführung überaus sinnvoll (vgl. Helmus 2009, S. 45; Helmus 2011, S. 85; Forbau 2012, S. 8-9; Gasteiger 2015, S. 37, S. 81, S. 89, S. 124 und S. 132; BM 2016, S. 109; Schreyer 2016, S. 66; Herter & Silbe 2017a, S. 114 und S. 116; Blödorn 2018, S. 30-31; Sander 2018, S. 34-35; Bauindustrie 2019, S. 7; Craftnote 2019, o. S.). Zusätzlich zur Kennzeichnung bereits fertiggestellter Bauteile oder abgeschlossener Bauabschnitte in einem BIM-Modell (vgl. Schaper & Tulke 2015, S. 437; Röschenkemper 2018, S. 91) liefern z. B. Eingaben von Wetterdaten darüber hinaus ebenfalls Daten für eine durchgängige Objektdokumentation, so dass stets aktuelle Ist-Zustände vorliegen (vgl. Herter & Silbe 2017a, S. 114; Berner et al. 2018, S. 263 Blödorn 2018, S. 31). Die jeweiligen Bauwerksinformationsmodelle können somit als Übergabedokumentation an alle weiteren Projektbeteiligten verwendet werden (vgl. Baier & Díaz 2017, S. 32). Durch die aktuellen Eingaben vor Ort entsteht letztendlich ein *As-built-Modell*, das detaillierte Informationen zur Ausführung, zu den verwendeten Materialien und Produkten sowie ggf. Verweise auf Prüfprotokolle und weitere Dokumente beinhaltet (vgl. Hausknecht & Liebich 2016, S. 124; Prüser 2016, S. 66; Bauindustrie 2019, S. 7).⁵

Als direkter Vorteil einer digitalen Baudokumentation kann neben der Zeitersparnis, insbesondere die Qualitätsverbesserung – die bestenfalls nicht nur durch die transparenten und nachvollziehbaren Vorgänge, sondern auch durch die damit verbundene frühzeitige Fehlererkennung eintritt – genannt werden (vgl. Ganschar et al. 2013, S. 64; Gasteiger 2015, S. 132; BM 2016, S. 109; Herter & Silbe 2017a, S. 111 und S. 115; Blödorn 2018, S. 31; Site Diary 2018, o. S.). Mithilfe einer echtzeitnahen Dokumentation sind darüber hinaus die jeweiligen Baufortschritte anhand eines Vergleichs mit dem zuvor erstellten Modell, einer festgelegten Projektablagestruktur und bestenfalls einer direkten GPS-Verortung, ebenfalls überprüfbar (vgl. Helmus 2011, S. 85; Tulke & Schaper 2015, S. 415; BM 2016, S. 109; Schreyer 2016, S. 66; Baier & Díaz 2017, S. 32; Herter & Silbe 2017a, S. 111, S. 114 und S. 116; Site Diary 2018, o. S.; Sander 2018, S. 34; Bauindustrie 2019, S. 7).

⁵ *As-built-Modelle* werden im deutschen Sprachraum auch als *Wie-gebaut-Modelle* bezeichnet. Stellenweise spricht man auch von *Digitalen Bauwerksakten* oder von *Field-to-BIM* (vgl. Schaper & Tulke 2015, S. 438).

Ein praxisnahes, auf Massivbautätigkeiten bezogenes Beispiel für einen digitalen Dokumentationsprozess kann im Hinblick auf die Überwachung von Betonqualitäten – bei denen die Nachweise mindestens fünf Jahre aufbewahrt werden müssen (vgl. Jehle et al. 2013, S. 66) – herangezogen werden. So ist bei der Herstellung von Betonbauteilen nicht nur festzuhalten, zu welchem Zeitpunkt die Betoniervorgänge stattgefunden haben, sondern auch, wie lange es gedauert hat, bis diese abgeschlossen waren (vgl. ebd.). Auch die Namen der Lieferwerke, die Nummern der Lieferscheine, die Betonsorten und die zugehörigen Bauabschnitte oder Bauteile sind im Rahmen von Betonbauarbeiten stets zu notieren (vgl. ebd.). Die entstandenen und mit verschiedenen Attributen versehenen Bauteile gewährleisten innerhalb der Methode BIM somit die notwendigen projektspezifischen Verknüpfungen und Referenzierungen aller hergestellten Betonelemente (vgl. Berner et al. 2018, S. 262). Eine strukturierte Dokumentation der Einbaudaten ermöglicht dadurch nicht nur eine detaillierte Leistungsmeldung von Seiten der Bauausführung, sondern auch eine modellbasierte und stets für alle Projektbeteiligten einsehbare Baufortschrittskontrolle (vgl. ebd., S. 263).

Die hier kurz angerissenen Aspekte digitaler Baudokumentationen werden zukünftig nicht nur von Bauvorhaben zu Bauvorhaben zunehmen, sondern mit der Zeit auch immer umfangreicher werden (vgl. Schaper & Tulke 2015, S. 437; Berger 2016, S. 13).

Insgesamt ist festzuhalten, dass sich die Anforderungen an Baufacharbeiterinnen und Baufacharbeiter – insbesondere durch die Methode BIM – stark verändern werden. So zählen zu den notwendigen BIM-Kompetenzen zukünftig nicht nur Kenntnisse zum Umgang mit digitalen Bauwerksinformationsmodellen, z. B. zum Filtern, Auslesen oder Dokumentieren von Informationen (vgl. Prüser 2016, S. 69), sondern auch zu den damit einhergehenden übergeordneten neuen bauleistungsorientierten Abläufen sowie zu den sich verändernden Rollenverteilungen und der damit verknüpften modifizierten Fachsprache.

3.1.2 Vor- und Nachteile der Digitalisierung für die Bauausführung

Anknüpfend an die im vorherigen Abschnitt aufgeführten Veränderungen infolge Digitalisierung werden nachfolgend die mit der Nutzung digitaler Arbeits- und Hilfsmittel einhergehenden Vor- und Nachteile aufgeführt. Bei den positiven Auswirkungen handelt es sich explizit um wirtschaftliche Aspekte, um die bereits angesprochenen veränderten Arbeitsprozesse, um Qualitätsverbesserungen, um körperliche Entlastungen, um den Zuwachs an Kompetenzen sowie um Weiterentwicklungen in Bezug auf die Baustellensicherheit. Einige der hier dargestellten Vorteile wurden teilweise bereits in Abschnitt 2.3: *Building Information Modeling in der Bauausführung* genannt. Durch diese Überschneidungen wird deutlich, dass die nachfolgend aufgeführten Vorteile nicht nur im Hinblick auf die Bauausführung zu betrachten sind, sondern darüber hinaus auch für die Planung und die Nutzung von Bauwerken eine große Relevanz aufweisen. Im Anschluss an die Vorteile werden die mit der Digitalisierung einhergehenden Nachteile genannt. Mit Bezug zu der in Abschnitt 1.1 dargestellten Wichtigkeit zur Auseinandersetzung mit der Thematik dient der vorliegende Abschnitt dazu, die dort skizzierten Punkte auf die Bauausführung hin nicht nur zu verfestigen, sondern gleichzeitig auch dazu, um aufzuzeigen, dass die Digitalisierung wesentliche Vorteile für Arbeitsprozesse auf Baustellen bereithält. Darüber hinaus können die hier aufgeführten Aspekte ebenfalls als Grundlage für die im folgenden Abschnitt 3.1.3 dargestellten Schwierigkeiten bei den Implementierungen digitaler Arbeitsmethoden in kleinen und mittelständischen Bauunternehmen angesehen werden.

Wirtschaftlichkeit und Produktionsleistung

Vergleicht man Arbeitsprozesse auf Baustellen mit stationären Fertigungsabläufen, so können zahlreiche Vorgänge im Rahmen der Digitalisierung angepasst und verbessert werden. Neben stellenweise stark überzogenen Bauzeiten werden im Hinblick auf die Errichtung von Bauwerken häufig die sehr hohen Kosten als maßgebende Gründe für unwirtschaftliche Baumethoden oder unproduktive Vorgehensweisen herangezogen (vgl. Poppy et al. 1995, S. 94). Auch in Bezug auf die eigentlichen vor Ort stattfindenden Arbeitsprozesse sind viele Abläufe heute noch sehr ineffizient. So verbringt bspw. ein Polier einen Großteil seiner Zeit mit Arbeitstätigkeiten, die eigentlich nur einen geringen Umfang seiner Kernaufgaben ausmachen sollten. Dazu zählt bspw. das häufige Telefonieren, das papierbasierte Dokumentieren diverser Vorkommnisse oder das aufwendige Suchen von Materialien (vgl. Gillies 2017, S. 18). Zudem werden – betrachtet man explizit übergeordnete Aufgaben aus Bereichen des Massivbaus – oft zu große Mengen für die Herstellung von Betonbauteilen bestellt (vgl. Berner et al. 2018, S. 262), die dann auf umständliche Art und Weise entsorgt werden müssen, was wiederum nicht nur Zeit in Anspruch nimmt, sondern auch unnötige Kosten verursacht.

Mithilfe der bereits dargestellten digitalen Arbeits- und Hilfsmittel sind nun aus wirtschaftlicher Sicht viele Verbesserungen zu erwarten. In erster Linie kann davon ausgegangen werden, dass sich durch die Implementierung technologischer Innovationen

und durch zusätzliche Nutzungen von BIM-Modellen erhebliche Effizienz- und Produktivitätssteigerungen einstellen werden (vgl. Poppy et al. 1995, S. 93; Arnold et al. 2015, S. 19-20; Berger 2016, S. 14; BM 2016, S. 109; McDonnell 2017, S. 88; Mechtcherine & Nerella 2018b, S. 496; van Sante 2019, S. 9). Durch mögliche Kostensenkungen aufgrund schnellerer Bauprozesse und den damit einhergehenden Zeitersparnissen (vgl. BM 2016, S. 109; Berger 2016, S. 14; Hausknecht & Liebich 2016, S. 52; McDonnell 2017, S. 89; Mechtcherine & Nerella 2018b, S. 496; Koutsogiannis 2019, o. S.) ergeben sich zudem weitere Vorteile für Menschen und Umwelt, z. B. durch höhere Qualitäten von Bauwerken oder durch die offeneren und transparenteren Arbeitsweisen (vgl. Fredenlund 2017, S. 71; Mechtcherine & Nerella 2018b, S. 496). Berücksichtigt werden sollte aber, dass einige Prozesse auf Baustellen nur bedingt einer zeitlichen Optimierung unterliegen. Selbst wenn es – wie in Abschnitt 2.4.3 gezeigt – zukünftig verstärkt möglich sein wird, Ausschallfristen von Betonbauteilen mithilfe digitaler Sensoren genau zu bestimmen, kann das eigentliche Abbinden des Betons nur bedingt beschleunigt werden (vgl. Gschösser et al. 2019, S. 248).

Verbesserte Arbeitsprozesse und echtzeitnahe Baulogistik

Die bereits in Abschnitt 3.1.1 thematisierte Informatisierung übt nicht nur durch die unmittelbare Beziehung von Daten einen großen Einfluss auf Baustellenarbeitsprozesse aus, sondern auch durch die mit dem zentralen Modell einhergehenden anschaulichen Nutzungsmöglichkeiten der Planungs- und Ausführungsunterlagen. So unterstützen bspw. dreidimensionale Echtzeit-Visualisierungen durch übersichtliche Darstellungen aller relevanten Geometrien die eigentlichen Herstellungsprozesse (vgl. Forbau 2012, S.8; BMBF 2013, S. 18; Christalon & Neubauer 2015, S. 508; BM 2016, S. 109; Schreyer 2016, S. 51; McDonnell 2017, S. 88). Der damit einhergehende Vorteil wird sofort ersichtlich, wenn man sich vergegenwärtigt, dass bei traditionellen Bauprozessen nur rund 30 % der Arbeitszeit den tatsächlichen Herstellertätigkeiten gewidmet werden (vgl. Berger 2016, S. 10). Durch eine direkte Verfügbarkeit von Daten treten diesbezüglich Verbesserungen in erster Linie auf, weil die eigentlichen Kernarbeiten zum Herstellen von Bauteilen wieder in den Fokus von Baufacharbeiterinnen und Baufacharbeitern rücken. Baufachkräfte haben – sollte es nicht zu anderweitigen Zugangsproblemen kommen – durch die unmittelbaren Zugriffe alle relevanten Ausführungsunterlagen echtzeitnah zur Hand (vgl. BM 2016, S. 109).

Neben den Vorteilen der direkten Informationsgewinnung, sind insbesondere auch die damit eng verbundenen Kommunikationsvorgänge weitere nennenswerte Verbesserungen infolge Digitalisierung.⁶ Durch eine direkte Vernetzung aller Projektbeteiligten – was auch die im Baufeld Beteiligten miteinbezieht – ergeben sich effektive Möglichkeiten, auftretende Probleme zeitnah zu erörtern und bestenfalls direkt zu lösen. Mithilfe eines digital verwalteten Wissensmanagements findet der Austausch von Informationen somit stets systematisch und strukturiert statt (vgl. Rathswohl 2014, S. 38). Ein weiterer

⁶ Aspekte der Informatisierung und Kommunikation werden in Kapitel 4 genauer behandelt.

Vorteil besteht darin, dass nicht nur Poliere, sondern auch andere zugangsberechtigte Personen auf die Modellinhalte zurückgreifen können. Dadurch werden nicht nur Umwege gespart – z. B. können Vorarbeiterinnen und Vorarbeiter notwendige Angaben auf Grundlage digitaler Modelle autark erfragen –, auch hilft es, dass durch die zentralen digitalen Bestätigungen weniger Informationen verloren gehen und dass die beteiligten Fachkräfte sich bewusster an den eigentlichen Herstellungsprozessen beteiligen können.

Dies hat wiederum positive Einflüsse auf die bereits in Abschnitt 3.1.1 thematisierte Baulogistik. Vorteilhaft kann diesbezüglich hervorgehoben werden, dass zukünftig durch entsprechende vor Ort stattfindende, digital basierte Tätigkeiten, z. B. durch das Ausführen lasergesteuerter Messungen oder durch das Bestätigen eingetroffener Materiallieferungen, arbeitsprozessrelevante Abläufe infolge echtzeitnah koordinierter und optimierter Zusammenhänge starke Verbesserungen erfahren (vgl. BMBF 2013, S. 18; BM 2016, S. 109; Hausknecht & Liebich 2016, S. 12; Gschösser et al. 2019, S. 240). Kosten und Wartezeiten können bspw. durch Lieferungen *just in time* nicht nur verringert, sondern auch positionsgenau verortet und weniger aufwendig durchgeführt werden (vgl. Poppy et al. 1995, S. 97; Helmus 2009, S. 11; Forbau 2012; S. 9-10 Berger 2016, S. 10 und S. 14; Schreyer 2016, S. 71).

Betrachtet man explizit Arbeitsprozesse im Massivbau, so können Vorteile der Digitalisierung bspw. bei der Erstellung von Schalungen oder bei der Verlegung von Bewehrungen genannt werden (vgl. BM 2016, S. 109; Schreyer 2016, S. 51; Junge 2018, S. A 16; Klemt-Albert et al. 2018, S. 195). So ist es bei Nutzung von Augmented Reality u. a. möglich, dass die im Modell enthaltenen Elemente genau dort angezeigt werden, wo sie herzustellen bzw. zu verbauen sind. Damit entfällt der zwischenzeitliche und häufig auch fehleranfällige Übertrag von Angaben aus zweidimensionalen Papierplänen. Auch für Arbeiten im Mauerwerksbau können – wie bereits in Abschnitt 2.4.6 angedeutet – positive Aspekte durch die Digitalisierung genannt werden. So verbindet die maschinelle Verlegung von Steinen mit einem Roboterarm „effiziente und individuelle Fertigungsmethoden vor Ort mit den vorteilhaften Skaleneffekten der Massenproduktion“ (Glock 2018, S. 619). Darüber hinaus sind Maschinen und Roboter für verschiedene Transportszenarien im Rahmen von Massivbautätigkeiten denkbar.

Ein mit den hier angerissenen Aspekten einhergehender geringerer Dokumentationsaufwand im Rahmen von Baustellenarbeitsprozessen, z. B. durch das handschriftliche Festhalten von Notizen und das anschließende fehlerträchtige Eintippen in PC-Programme (vgl. BM 2016, S. 109), wurde bereits in Abschnitt 3.1.1 aufgegriffen und soll daher an dieser Stelle nur erwähnt werden. Dass die hier dargestellten Vorteile für die Tätigkeiten auf Baustellen insbesondere auch für kleine und mittelständische Bauunternehmen von großer Relevanz sind, wird in Abschnitt 3.1.3 weiter thematisiert.

Arbeitserleichterungen und körperliche Entlastungen

Insbesondere durch den Einsatz von Robotern ist mit einer erhöhten körperlichen Entlastung für Facharbeiterinnen und Facharbeiter infolge Digitalisierung zu rechnen. Nicht nur, dass ganze Tätigkeiten von Maschinen übernommen werden können, auch die in Abschnitt 2.4.6 dargestellten Exoskelette sind in der Lage, verschiedene kräfteintensive Arbeiten zu unterstützen. Da auf Baustellen die Körpereinsätze häufig nicht nur generell über ein normales Belastungsmaß hinausgehen, sondern stellenweise auch sehr kräfteintensiv sind, versprechen digitale Arbeits- und Hilfsmittel mögliche gesundheitsfördernde Abhilfen (vgl. Poppy et al. 1995, S. 93; Arnold et al. 2015, S. 1 und S. 10; BMAS 2015, S. 78; Bellmann 2017a, S. 4 und S. 9; Karl 2018, o. S.). Differenziert man Berufe branchenübergreifend nach verschiedenen Qualifikationsniveaus, so kann zusätzlich festgestellt werden, dass Beschäftigungen, die ein vermeintlich niedriges Niveau aufweisen, durch den Einsatz technologischer Neuerungen stärker von den digitalen Interaktionen profitieren als andere Bereiche (s. Abb. 3.1).

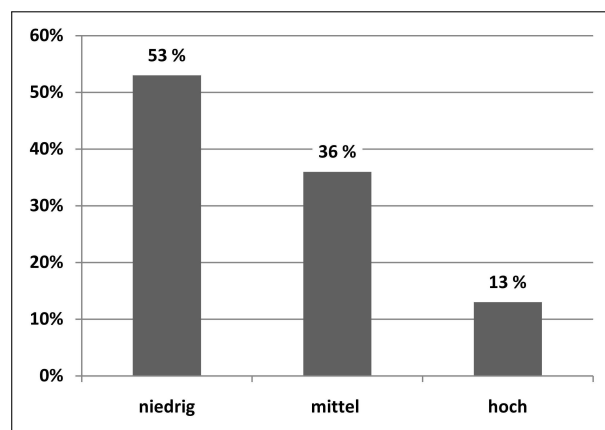


Abb. 3.1: Körperliche Entlastung nach Ausbildungsniveau (eigene Darstellung nach Arnold et al. 2015, S. 12)

Die Gruppe der Baufacharbeiterinnen und Baufacharbeiter kann durch die jeweils absolvierten Ausbildungen dem mittleren Qualifikationsniveau zugeordnet werden. Betrachtet man explizit Arbeitsprozesse auf Baustellen, so ist bspw. im Massivbau nicht nur das Herstellen von Schalungen, das Verlegen von Bewehrungen oder das Betonieren selbst mit sehr viel Körpereinsatz verbunden, sondern auch das Mauern stellt eine sehr arbeitsintensive Arbeit dar und kann infolge der mit diesen Tätigkeiten einhergehenden Langzeiteinwirkungen zu erheblichen körperlichen Schäden und auch zu frühzeitigen Ruheständen von

Maurerinnen und Maurern führen (vgl. Poppy et al. 1995, S. 93; Saidi et al. 2016, S. 1500).⁷ Über die eigentlichen Baustellentätigkeiten hinaus kann im Hinblick auf mögliche Arbeitserleichterungen ein weiteres, eher indirektes Phänomen herangezogen werden. So ist der Hauptgrund für Abwanderungen von Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmern aus der Baubranche die hohe körperliche Belastung. Mit 38 % stellt sie die größte Gruppe dar; noch vor der Tatsache, dass zu wenig Gehalt für die entsprechend schweren Tätigkeiten gezahlt wird (vgl. Macherey & Middendorf 2019, S. 58).

⁷Eine genaue Analyse hinsichtlich ergonomischer Risiken im Beruf von *Maurer/-innen* kann Golabchi et al. (2018) entnommen werden. Dort werden verschiedene Gelenke und Körperteile (Rumpf, Arme und Beine) hinsichtlich ihrer Belastung untersucht.

Zuwachs an Anforderungen und Kompetenzen

Neben den zuvor aufgeführten und meist systembedingten Vorteilen sind ebenfalls Veränderungen hinsichtlich subjektbezogener Fähigkeiten und Kompetenzen auf Seiten der ausführenden Fachkräfte ins Auge zu fassen. So wird im Rahmen der Digitalisierung stellenweise erwartet, dass zukünftig Entscheidungsfreiheiten branchenübergreifend innerhalb der jeweiligen Arbeitsprozesse zunehmen werden (vgl. Arnold et al. 2015, S. 1 und S. 10). Mit Einbindung technologischer Neuentwicklungen gehen infolge Ersetzbarkeit und Prozessübernahmen durch Roboter vordergründig verringerte Anforderungen an Fähigkeiten und Kompetenzen einher (vgl. ebd., S. 10-13). In einer Umfrage des *Instituts für Arbeitsmarkt und Berufsforschung (IAB)* aus dem Jahr 2015 wurden Beschäftigte danach befragt, ob technologische Neuerungen ihnen weniger Fähigkeiten und Kompetenzen abverlangen (vgl. Arnold et al. 2015, S. 12). Während es bei den niedrig Qualifizierten – also den Personen ohne Ausbildungsabschluss – insgesamt 29 % der Beschäftigten waren, lag der Wert der Arbeitskräfte mit abgeschlossener Berufsausbildung bei 21 % (s. Abb. 3.2). Berufstätige mit mittelhohem Ausbildungsniveau, z. B. Meister/innen oder Absolvent/-innen von Fachschulen, belegen mit 14 % ebenfalls einen ebenfalls vergleichsweise hohen Wert gegenüber Universitätsabgängerinnen und Universitätsabgängern mit nur 3 % (vgl. ebd., S. 11-12).

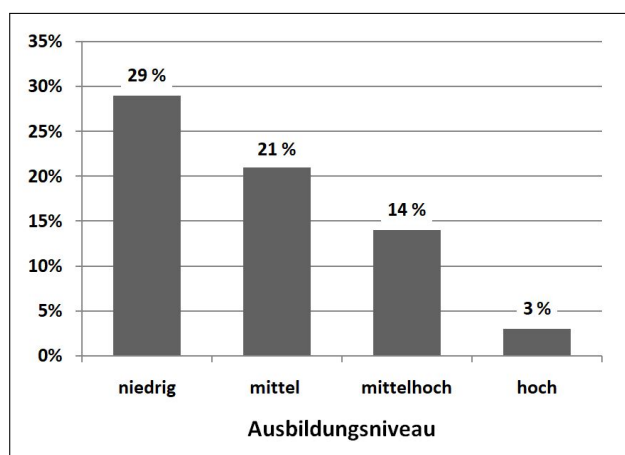


Abb. 3.2: Reduzierte Anforderungen nach Ausbildungsniveau (eigene Darstellung nach Arnold et al. 2015, S. 12)

Wie bereits in den vorherigen Abschnitten dargelegt, können digitale Technologien in Zukunft viele Abläufe beschleunigen. Durch die damit einhergehenden Änderungen werden aber nicht nur Anforderungen reduziert, sondern gleichzeitig auch neue Tätigkeitsgebiete geschaffen, die in einigen Fällen wiederum höhere Anforderungen mit sich bringen (vgl. ebd., S. 2). So ist neben den zuvor genannten verstärkten Entscheidungsfreiheiten ebenfalls zu berücksichtigen, dass mit der Implementierung digitaler Arbeits- und Hilfsmittel auch die Berücksichtigungen stets anhaltender Weiterentwicklungen sowie die Notwendigkeiten zu einem stärkeren Multitasking einhergehen (vgl. ebd. S. 1).

Da der Zuwachs an Anforderungen und Kompetenzen im Hinblick auf eine verstärkte Informatisierung und Kommunikation für Baufachhandwerkerinnen und Baufachhandwerkern von großer Bedeutung ist, werden die entsprechenden Faktoren in Abschnitt 4.1 weitergehend berücksichtigt.

Erhöhte Arbeitssicherheit auf Baustellen

Während sich in einer stationären Fabrik fast alle Maschinen und Geräte an festen Orten befinden, gehen mit den immer wieder neu entstehenden Arbeitsumgebungen auf Baustellen stets hohe Gefahrenpotenziale einher (vgl. Meyser & Uhe 2006, S. 153). So stehen häufige Anpassungen von Arbeitswegen in einem mit vielfältigen Arbeitsschutzmaßnahmen versehenen Umfeld auf der Tagesordnung. Die immer wieder wechselnden und stets unterschiedlich vorzufindenden Bauzustände führen dabei häufig nicht nur zu leichten Verletzungen, z. B. durch hervorstehende Bewehrungsstähle, sondern vereinzelt auch zu tödlichen Unfällen, z. B. durch Abstürze. Nicht selten handelt es sich im Rahmen solcher Vorkommnisse um Situationen, in denen Baufacharbeiterinnen und Baufacharbeiter unachtsam sind (vgl. Zhang et al. 2019, S. 32).

Im Jahr 2016 gab es im Baugewerbe insgesamt 109.339 meldepflichtige Unfälle, was einen Prozentanteil von etwa 15 % ausmacht, wenn man alle Wirtschaftszweige in Deutschland mit ca. 720.000 Unfällen heranzieht (vgl. DGUV 2017, S. 25). Im Hinblick auf eine Reduzierung entsprechender Zahlen bietet auch hier die Digitalisierung verschiedene Verbesserungsmöglichkeiten (vgl. McDonnell 2017, S. 88). So liefern bspw. BIM-Modelle eine gute Grundlage, um Maßnahmen zur Verhinderung von Arbeitsunfällen bereits am virtuellen Modell zu berücksichtigen (vgl. Schreyer 2016, S. 40). Im Rahmen von Arbeitsvorbereitungen können ggf. bereits potenzielle Gefahrenquellen identifiziert und passende Sicherheitsmaßnahmen, wie bspw. Absturzsicherungen, geplant und vorgesehen werden. Zusätzlich ist es möglich vor Projektbeginn auf den jeweiligen Baustellen anhand von dreidimensionalen Modellen den Beteiligten zu erläutern, welche grundlegenden Sicherheitsmaßnahmen während der Arbeitstätigkeiten zu berücksichtigen sind, und was bspw. bei schwereren Vorfällen zu tun ist (vgl. ebd.). Im Hinblick auf automatisierte Sicherheitsvorkehrungen ist es – wie in Abschnitt 2.4.4 bereits dargestellt – ebenfalls denkbar, dass Persönliche Schutzausrüstungen (PSA) von Facharbeiterinnen und Facharbeitern gescannt werden, so dass ihnen ein Betreten der Baustelle erst ermöglicht wird, wenn sie alle sicherheitsrelevanten Ausstattungen dabei haben (vgl. Chevin 2018e, o. S.). Dies betrifft insbesondere Bauhelme, Sicherheitsschuhe oder Sicherheitswesten. Entsprechende Ausrüstungen können jedoch ebenfalls von Scannern, wie sie bspw. in Abschnitt 2.4.3 dargestellt sind, auch flächendeckend während des Tragens im Baustellenbetrieb erkannt werden (vgl. Easyflow 2019, o. S.).

Über die hier dargestellten Beispiele hinaus sind digitale Sicherheitsmaßnahmen nicht nur präventiv, sondern auch nach einem Unfall denkbar. So ist es bspw. möglich, Roboter in Fällen einzusetzen, bei denen Arbeiterinnen und Arbeiter aus einer gefährlichen Umgebung geholt werden müssen, aus denen sie von alleine nicht mehr heraus kommen können (vgl. Saidi et al. 2016, S. 1497). Auch wenn die bereits dargestellten digitalen Innovationen und die damit einhergehenden automatisierten Systeme in der Lage sind, Menschen von gefährlichen Aufgaben zu entlasten (vgl. Faber & Mertens 2018, S. 6), muss invers jedoch auch stets berücksichtigt werden, dass durch eine verstärkte Interaktion von Menschen und Maschinen die Gefahr von Unfällen ebenfalls zunehmen kann

(vgl. Zhang et al. 2019, S. 29).⁸ Weltweit werden diesbezüglich bereits viele Forschungsvorhaben – die erhöhte Sicherheiten von Baufachkräften infolge Digitalisierung in den Fokus nehmen – durchgeführt (vgl. ebd).

Qualitätssteigerungen und Fehlerreduzierungen

Durch die digital angepassten Prozesse auf Baustellen ergeben sich weitere Vorteile, die i. d. R. nicht vor Ort während der eigentlichen Arbeitsabläufe erkennbar sind, sondern vielmehr Auswirkungen auf die Nutzung bzw. die Dauerhaftigkeit und Lebensdauer der erstellten Bauwerke haben. So können bspw. mithilfe digitaler Arbeitsweisen mögliche Planungs- und Ausführungsfehler früher als bisher erkannt oder bestenfalls direkt reduziert bzw. ganz vermieden werden (vgl. BM 2016, S. 109; Hausknecht & Liebich 2016, S. 12; McDonnell 2017, S. 89; van Sante 2019, S. 11). Mithilfe von Augmented Reality und den damit einhergehenden positionsgenauen Angaben ist es u. a. möglich, Durchbrüche an falschen Stellen zu verhindern. Auch die Gefahr, dass Pläne seltener fehlinterpretiert bzw. falsch herum gehalten und dadurch Stützen nicht korrekt hergestellt werden, kann durch die Nutzung digitaler Technologien verringert werden. Zusätzlich zu den Reduzierungen von Ausführungsfehlern kommen ebenfalls Aspekte der Genauigkeit im Rahmen verstärkter Mensch-Maschine-Interaktionen hinzu. Durch präzisere Vorgänge können Arbeitsprozesse mithilfe von Robotern nicht nur unterstützt, sondern i. d. R. auch exakter ausgeführt werden (vgl. Schach et al. 2017, S. 356). Insgesamt ist festzuhalten, dass mit den Einbindungen digitaler Technologien Qualitätssteigerungen bzw. Erhöhungen der Nachhaltigkeit von Bauwerken einhergehen (vgl. Poppy et al. 1995, S. 97; McDonnell 2017, S. 88; Klemm-Albert et al. 2018, S. 190).

Nachteile bei Verwendung digitaler Arbeits- und Hilfsmittel auf Baustellen

Neben den aufgeführten Vorteilen müssen ebenfalls Nachteile berücksichtigt werden, die mit der Digitalisierung von Baustellenarbeitsprozessen zusammenhängen. So ist es übergeordnet wichtig, dass mögliche unerwünschte Effekte bestenfalls frühzeitig erkannt und umfangreich analysiert werden sollten. Insbesondere im Hinblick auf die speziellen Rahmenbedingungen von Baustellen sind diverse branchenspezifische Faktoren in Untersuchungen mit einzubeziehen.⁹ Beispielsweise gilt es, die häufig rauen Arbeitsbedingungen als erhöhte Anforderungen an die Robustheit digitaler Werkzeuge, z. B. Tablets oder Smartphones, zu beachten (vgl. Gasteiger 2015, S. 85 und S. 135; Schreyer 2016, S. 43). Mit der Nutzung mobiler Endgeräte geht darüber hinaus nicht nur das Problem einer konstanten Netzanbindung einher, sondern auch das Tragen von Arbeitshandschuhen stellt für eine flächendeckende Bedienbarkeit von Tablets ein übergeordnetes Problem dar (vgl. Schreyer 2016, S. 43). Zudem ist zu berücksichtigen, dass bei möglichen AR-Anwendungen – unabhängig davon, ob es sich um mobile Endgeräte oder

⁸Aspekte und Zusammenhänge von Robotern, die im soziotechnischen System *Baustelle* mit Bau fachhandwerkerinnen und Bau fachhandwerkern interagieren, werden in Abschnitt 3.3.2: *Mensch-Maschine-Interaktionen auf Baustellen* behandelt.

⁹Besonderheiten von Baustellenarbeitsprozesse infolge Digitalisierung werden in Abschnitt 3.4: *Effekte der Digitalisierung auf baustellenspezifische Besonderheiten* behandelt.

Headsets handelt – die Gefahr besteht, dass Baufachkräfte stärker darauf konzentriert sind, was auf den Bildschirmen in ihren Händen passiert, ohne dass sie dabei auf mögliche Gefahren vor Ort achten. So besteht ein erhöhtes Risiko, dass Personen bspw. gegen Objekte laufen, sich dabei verletzen oder sogar, dass sie aus größeren Höhen herabstürzen. Sollten keine mobilen Endgeräte, sondern Augmented Reality-Brillen zum Einsatz kommen, so muss darüber hinaus berücksichtigt werden, dass diese zersplittern und Menschen im Bereich der Augen verletzen können.

Nachteilig sei hier ebenfalls erwähnt, dass derzeit die bereits dargestellten Rollenverteilungen im Rahmen von BIM noch nicht vollumfänglich bzw. eins zu eins zugeordnet werden können. Die Vorgaben aus den in Abschnitt 2.3 erwähnten Rollen entspricht vielfach noch nicht den Anwendungen in der Praxis. Übergeordnet ist zudem festzuhalten, dass auch rechtliche Aspekte größtenteils noch nicht geklärt sind, was eine Nutzung digitaler Arbeitsweisen vorerst noch nicht in vollem Umfang möglich macht. Damit einher gehen ebenfalls verschiedene Phänomene, die im Hinblick auf mögliche Sicherheitsrisiken im Rahmen der neuen Informatisierungsprozesse auftreten.

Aspekte zu Substitutionen diverser Arbeitstätigkeiten – die nicht per se als Nachteil gewertet werden müssen – sind in Abschnitt 3.2: *Automatisierungswahrscheinlichkeiten von Baustellentätigkeiten* behandelt. Auch die bereits zuvor angesprochenen Interaktionen zwischen Menschen und Maschinen stellen die Abläufe auf Baustellen vor weitere, bisher nur wenig thematisierte Schwierigkeiten. Zukünftig müssen bspw. die Zusammenarbeitsprozesse von Fachkräften auf Baustellen mit Robotern geklärt sein, damit eine ausreichende Sicherheit, z. B. durch visuelle oder akustische Signale, gewährleistet werden kann. Entsprechende Faktoren werden in Abschnitt 3.3: *Soziotechnischer Wandel von Baustellen infolge Digitalisierung* behandelt. Bevor im anschließenden Abschnitt 3.1.3 die Auswirkungen auf kleine und mittelständische Bauunternehmen analysiert werden, sei noch darauf hingewiesen, dass am Ende von Kapitel 3 die hier kurz angerissenen baustellenspezifischen Besonderheiten im Hinblick auf die Einbindung digitaler Arbeits- und Hilfsmittel erneut aufgegriffen und thematisiert werden (s. Abschnitt 3.4).

3.1.3 Digitalisierung in kleinen und mittelständischen Bauunternehmen

Durch das Aufzeigen der Vorteile im vorangegangenen Abschnitt wird deutlich, dass die Digitalisierung nicht nur für einige Bereiche, sondern für fast alle Beteiligten zukünftig eine immer größere Rolle spielen wird. Betrachtet man diesbezüglich die strukturellen Gegebenheiten des deutschen Bauwesens, so kann festgestellt werden, dass Einbindungen digitaler Neuentwicklungen nicht nur im Hinblick auf große Bauunternehmen, sondern insbesondere auch für die vielen kleinen und mittelständischen Betriebe berücksichtigt werden müssen. Im vorliegenden Abschnitt wird dargestellt, dass gerade im Hinblick auf die Implementierung technologischer Neuentwicklungen in eher kleinteilige Strukturen besonderer Handlungsbedarf besteht. Neben dem Aufzeigen branchenspezifischer Probleme werden diesbezüglich auch potenzielle Nutzungsmöglichkeiten für kleine und mittelständische Unternehmen skizziert. Der vorliegende Abschnitt dient anknüpfend an die Erkenntnisse aus der Sektoranalyse als Grundlage für die Online-Umfrage in Kapitel 4. Ergänzend zu den hier dargestellten Herausforderungen wird in Abschnitt 4.4: *Übersicht zur Struktur des Bauwesens in Deutschland* eine auf die Umfrage ausgelegte aktuelle Übersicht über die Verteilung von Baufirmen in Deutschland dargestellt.

Relevanz zur Berücksichtigung kleiner und mittelständischer Bauunternehmen

Obwohl bereits das Interesse für die Methode BIM auch bei Handwerksbetrieben zu steigen scheint (vgl. Hausknecht & Liebich 2016, S. 12), kann übergeordnet festgehalten werden, dass Prozesse zur Einbindung digitaler Abläufe vorerst nur in größeren Bauunternehmen zu finden sind. Zieht man einen Bericht des *Instituts für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung (IAB)* aus dem Jahr 2016 heran (vgl. Arntz et al. 2016, S. 7), so hatte sich zu diesem Zeitpunkt ca. ein Drittel der kleineren Produktionsbetriebe in Deutschland bisher noch nicht mit modernen Technologien beschäftigt. Häufig sind kleinere Unternehmen nicht nur skeptischer, zögerlicher, zurückhaltender und auch unsicherer, wenn es um die Nutzung neuer Innovationen geht (vgl. Planen Bauen 4.0 2015a, S. 4; Beck & Nagel 2016, S. 13; Jokovic & Stockinger 2016, S. 49), auch sind sie i. d. R. finanziell eingeschränkter, wenn größere Investitionen getätigt werden müssen (vgl. Rathswohl 2014, S. 92; Lindemann & Syben 2019, S. 9). Auch wenn die Hürden damit augenscheinlich höher sind als bei großen Unternehmen (vgl. Kruppe et al. 2017, S. 7), sind digitale Anschaffungen inzwischen auch für kleine und mittelständische Betriebe bereits erschwinglicher geworden (vgl. BMBF 2013, S. 20). Bisher engagieren sich die entsprechenden ausführenden Firmen jedoch eher unterdurchschnittlich bzw. oft nur sporadisch, wenn es um digitale Neuerungen geht (vgl. Büllingen & Stamm 2016, S. 3). Stellenweise existieren darüber hinaus im Bauwesen sogar Abneigungen gegenüber der Methode BIM (vgl. Syben 2018, S. 33).

Wie bereits zuvor in den Abschnitten 1.1 und 2.3 dargestellt, wird jedoch kaum ein Unternehmen im Bauwesen an der Digitalisierung vorbeikommen (vgl. BM 2016, S. 109; Hausknecht & Liebich 2016, S. 19; Sommer 2019, o. S.). Somit ist es im Hinblick auf die kleinteilig strukturierte deutsche Bauwirtschaft überaus wichtig, dass trotz größerer

Schwierigkeiten bei der Einführung digitaler Arbeitsmittel auch kleine bis mittelgroße Baufirmen in einem entsprechenden BIM-basierten Implementierungskonzept berücksichtigt werden (vgl. Hausknecht & Liebich 2016, S. 19; Brehm 2019, S. 92; Lindemann & Syben 2019, S. 8). Auch wenn das Phänomen der Digitalisierung bei vielen Unternehmen häufig noch als reines Technologiethema wahrgenommen wird (vgl. Beck & Nagel 2016, S. 14), müssen ausführende Firmen sich mit den neuen Werkzeugen sowie der Methode des Building Information Modeling auseinandersetzen und die damit verbundenen Herausforderungen angehen bzw. entsprechende Änderungen umsetzen (vgl. Berger 2016, S. 14). Leider fehlen diesbezüglich nicht nur Digitalisierungs-Konzepte der einzelnen Betriebe, sondern darüber hinaus auch grundlegende, häufig noch auf traditionellen Säulen ruhende Strategien bzw. Management-Systeme (vgl. Rathswohl 2014, S. 38 u. S. 116; Jokovic & Stockinger 2016, S. 52). Da sich insbesondere auch die unternehmensinternen Organisationsstrukturen verändern werden (vgl. Berbig et al. 2003, S. 5), sollten kleine und mittelständische Firmen ihre Konzepte nicht nur im Hinblick auf die reine Nutzung digitaler Arbeits- und Hilfsmittel ausrichten, sondern ebenfalls auf eine flexible Anpassung an verschiedene digital ausgerichtete Bauprojekte (vgl. ebd., S. 2). Dies betrifft nicht nur große, sondern insbesondere auch kleinere Bauvorhaben, an denen sich insbesondere die Handwerksbetriebe im Rahmen der Digitalisierung in Zukunft weiterhin beteiligen müssen (vgl. Planen Bauen 4.0 2015b, S. 19; Prüser 2016, S. 72; Baier & Díaz 2017, S. 29).

Viele Vorteile für kleinere Baufirmen decken sich mit den zuvor genannten positiven Effekten, die im Rahmen der Digitalisierung bereits in Abschnitt 3.1.2 genannt wurden. Stellenweise werden in der Fachliteratur aber auch explizit Potenziale und Chancen für kleine und mittelständische Unternehmen hervorgehoben (vgl. Beck & Nagel 2016, S. 12; Jokovic & Stockinger 2016, S. 49; Krause 2016, S. 41). Neben den allgemeinen Rationalisierungseffekten betrifft dies bspw. auch Verbesserungen im Rahmen betriebsinterner Kommunikationsformen oder den stets anzupassenden Baustellenplanungen sowie die bereits zuvor behandelten Dokumentationsprozesse vor Ort (vgl. Berbig et al. 2003, S. 3; Rathswohl 2014, S. 88 und S. 94). Mithilfe digitaler Abläufe, z. B. bei Verwendung von RFID-Systemen oder bei Nutzung eines digitalen Vergabe- und Nachtragsmanagements, lassen sich darüber hinaus auch bei kleinen und mittelständischen Bauunternehmen unnötige Doppelarbeiten vermeiden (vgl. Schneider & Günthner 2009, S. 1; Kölzer & Ranke 2014, S. 30; Rathswohl 2014, S. 94; Glock 2018, S. 621). Ein weiterer nennenswerter Vorteil für kleinere Baufirmen liegt v. a. in der Kundennähe. Mithilfe direkter Kontakte zu Bauherrinnen und Bauherren bieten sich im Rahmen der Digitalisierung unmittelbare und auf digitalen Informations- und Kommunikationswegen effektive Dienstleistungen an (vgl. Berbig et al. 2003, S. 3). Dies hat wiederum Einfluss auf die Wettbewerbsfähigkeit der kleinen und mittelständischen Unternehmen, die aufgrund der optimierten digitalen Abläufe nicht nur ihre eigenen Chancen verbessern, sondern sich darüber hinaus ebenfalls sehr stark am baugewerblichen Umsatz beteiligen (vgl. Berbig et al. 2003, S. 1; Rathswohl 2014, S. 10; Berger 2016, S. 13; Schneider & Malkwitz 2017, o. S.). Somit ist es auch aus gesamtwirtschaftlicher Sicht wichtig, dass nicht nur große Baufirmen entsprechende Möglichkeiten im Rahmen der Digitalisierung

nutzen, sondern dass auch kleine Unternehmen berücksichtigt werden bzw. dass sie sich selbst durch innovative Ansätze einbringen oder ggf. mithilfe übergeordneter staatlicher und auch privater Einrichtungen Unterstützung bekommen (vgl. Gabriel 2015, S. 213; Büllingen & Stamm 2016, S. 3; Hausknecht & Liebich 2016, S. 20).

Notwendige Anpassungen von Informatisierungs- und Kommunikationsvorgängen in kleinen und mittelständischen Bauunternehmen

Da der digitale Wandel alle Bereiche von Unternehmen erfasst (vgl. Krause 2016, S. 37), ist es überaus relevant, dass auch die damit verbundenen kommunikativen Prozesse – die in den meisten Fällen in handwerklich ausgerichteten Kleinbetrieben eher unzureichend sind (vgl. Rathswohl 2014, S. 11) –, analysiert und im Hinblick auf die bereits angesprochenen Änderungen durch die Methode des Building Information Modeling berücksichtigt werden. Obwohl die Informations- und Kommunikationswege in kleinen und mittelständischen Bauunternehmen relativ kurz sind (vgl. Rathswohl 2014, S. 11 und S. 38; Beck & Nagel 2016, S. 14; Schönbeck 2016, S. 286) und viele Prozesse durch enge soziale Beziehungen auf einer informellen Ebene stattfinden (vgl. Rathswohl 2014, S. 11; Beck & Nagel 2016, S. 14), sind digitale Informationstechnologien, strategische Managementsysteme oder einheitliche Software-Produkte i. d. R. in entsprechenden Firmen wenig ausgeprägt und in vielen Fällen auch nicht standardisiert (vgl. Meyser 2010, S. 72; Kölzer & Ranke 2014, S. 38; Rathswohl 2014, S. 88 und S. 92; Jokovic & Stockinger 2016, S. 50). Wie bereits angedeutet finden Kommunikationsprozesse auf Baustellen kleinerer Betriebe häufig noch über zweidimensionale Pläne statt (vgl. Lindemann & Syben 2019, S. 8).¹⁰ Sollten dennoch EDV-gestützte Hardware-Komponenten und digitale Technik zur Verfügung stehen, so werden diese in den entsprechenden Betrieben i. d. R. nur selten erneuert (vgl. Rathswohl 2014, S. 92).

Da zukünftig alle beteiligten Personen und alle projektbezogenen Prozesse im Rahmen von Building Information Modeling digital berücksichtigt werden sollen (vgl. Planen Bauen 4.0 2015a, S. 4; Haas 2017, S. 71) und die Fülle an täglich neuen Informationen stetig ansteigt oder projektbezogene Vorgänge über Datenaustausch-Plattformen wie Cloud Computing immer relevanter werden (vgl. BMBF 2013, S. 20; Rathswohl 2014, S. 1), rücken die bisher noch wenig betrachteten Informatisierungsprozesse auch bei kleinen und mittelständischen Bauunternehmen immer häufiger in den Vordergrund. Folglich müssen traditionelle Kommunikationsformen und bestehende Wissensvermittlungen im Hinblick auf die immer stärker digital ausgerichteten Vorgänge angepasst werden (vgl. Berbig et al. 2003, S. 1; Rathswohl 2014, S. 2).

Geht man aufgrund der hier skizzierten Lage von einem wenig digitalisierten Umfeld in kleinen und mittelständischen Bauunternehmen aus – in dem weder die in Abschnitt 2.4 dargestellten innovativen Technologien, noch die Methode BIM Anwendung finden (vgl.

¹⁰In Abschnitt 4.2: *Kommunikationsvorgänge auf Baustellen* wird ausführlicher auf Aspekte der Kommunikation eingegangen.

Lindemann & Syben 2019, S. 9) – so kann festgehalten werden, dass die zuvor aufgezeigten Möglichkeiten und die damit einhergehenden Vorteile bisher nur in geringem Maße in Baustellenarbeitsprozessen einbezogen sind.¹¹ Die auf den hier dargestellten Erkenntnissen aufbauende Online-Umfrage wird in Anlehnung an die mit der in Abschnitt 1.1 aufgestellten These, dass die Verbreitung digitaler Werkzeuge in deutschen Bauunternehmen wenig ausgeprägt ist (vgl. Arntz et al. 2016, S. 2), in Kapitel 5 erneut aufgegriffen.

¹¹Die These, dass sich klassische Betriebe im Zuge der Digitalisierung verflüchtigen und dass an deren Stelle zunehmend global vernetzte betriebliche Strukturen entstehen, die sich virtuell um Unternehmenskerne herum gruppieren (vgl. Rauner 2014, S. 50), wird im Rahmen des Forschungsvorhabens nicht weiter behandelt.

3.2 Automatisierungswahrscheinlichkeiten von Baustellentätigkeiten

3.2.1 Einordnung und Definitionen relevanter Begriffe

Um die in Abschnitt 3.1 aufgeführten Effekte infolge Digitalisierung für Prozesse auf Baustellen richtig einordnen zu können, sind weitere Betrachtungen zu möglichen Ersetzbarkeiten im Rahmen der anstehenden und häufig noch unbekanntem Entwicklungen notwendig. Um diesbezüglich Rückschlüsse auf die vielförmigen Wahrscheinlichkeiten zukünftiger Mensch-Maschine-Interaktionen zu ermöglichen, werden im vorliegenden Abschnitt diverse Aspekte von Substituierbarkeiten untersucht. Für den Einstieg in die Thematik sind dafür einleitend grundlegende Begriffe erläutert, die im Rahmen einer Auseinandersetzung mit Inhalten der Automatisierung übergeordnete Relevanz aufweisen. In Abschnitt 3.2.2 ist daran anknüpfend eine branchenübergreifende Darstellung von Forschungsergebnissen zu bereits auf internationaler Ebene ermittelten möglichen Automatisierungswahrscheinlichkeiten bzw. zu aktuellen Substituierbarkeitspotenzialen zu finden. Damit einhergehend wird ebenfalls auf die Unverzichtbarkeit menschlicher Arbeitstätigkeiten in diversen Bereichen hingewiesen. Aufbauend auf der Darstellung globaler Aussagen, wird in Abschnitt 3.2.3 der aktuelle Forschungs- und Wissensstand zu Automatisierungswahrscheinlichkeiten und Substituierbarkeitspotenzialen in Deutschland aufgezeigt. Dabei werden neben einem Vergleich verschiedener Berufssegmente mit dem Bauwesen auch diverse Aufgabenbereiche beteiligter Akteurinnen und Akteure, die an der Erstellung von Bauwerken beteiligt sind, analysiert und anhand einer Tabelle aufgeführt.

Routine- und Nicht-Routine-Tasks

Der aus dem Französischen stammende Begriff *Routine* kann als „gewohnheitsmäßige Ausführung einer Aufgabe“ (Müller 2012, S. 264-265) interpretiert werden. Entsprechende, sich wiederholende Abläufe stellen dabei in erster Linie Tätigkeiten dar, die „nach programmierbaren Regeln ausgeführt werden“ (Wolter et al. 2015, S. 41) können. Beispiele für solche Arbeitsprozesse finden vorrangig unter stationären Bedingungen statt, die i. d. R. nach ein und demselben Prinzip ablaufen. Man spricht in diesen Fällen von *Routine-Tasks*, die sowohl von Menschen, als auch von Maschinen übernommen werden können (vgl. Dengler et al. 2014, S. 7). Sind Aufgaben hingegen nicht nach einem sich wiederholenden Schema ausführbar, handelt es sich um sog. *Nicht-Routine-Tasks*. Diese Vorgänge sind – mit Hinblick auf die zunehmende Digitalisierung – durch die Verwendung von Computern per Definition lediglich unterstützbar (vgl. ebd.). Eine entsprechende Unterscheidung zwischen diesen Tasks ist insbesondere im Zuge einer Analyse von Baustellentätigkeiten erforderlich. Eine einfache Differenzierung zwischen Routine und Nicht-Routine reicht jedoch infolge immer stärkerer Digitalisierungsprozesse nicht mehr aus. So ist es u. a. ebenfalls wichtig zwischen manuellen und kognitiven Vorgängen

zu unterscheiden (vgl. Möller 2015, S. 13).¹² Tasks können im Hinblick auf mögliche Ersetzbarkeiten generell in fünf Typen eingeteilt werden.¹³ Diese fünf Unterscheidungen werden in Abschnitt 3.2.4 für Tätigkeiten im Rahmen von Baustellenarbeitsprozessen herangezogen und im Zuge einer damit einhergehenden Analyse von Rollen und Verantwortlichkeiten aus Bereichen der Bauplanung und Bauausführung genauer betrachtet (s. dazu insbesondere auch Tab. 3.1).

Automation einzelner Operationen

Unter dem Begriff *Automation* versteht man i. A. Herstellungsverfahren mit völliger oder weitestgehender Selbsttätigkeit (vgl. Müller 2012, S. 43; Cambridge 2018, o. S.). Stellenweise – und so wird der Terminus auch innerhalb des vorliegenden Forschungsvorhabens verstanden – spricht man bei Automationen ebenfalls von Substitutionen menschlicher Arbeitskräfte durch technische Systeme oder Maschinen (vgl. Hafner & Berlack 2018, S. 50). Betrachtet man bspw. Automationen auf Baustellen, so stellen in erster Linie die in Abschnitt 2.4 dargestellten 3D-Druckverfahren und die vielfältig einsetzbaren Roboter entsprechende mögliche Ersetzbarkeiten dar (vgl. ebd., S. 50 und S. 53).

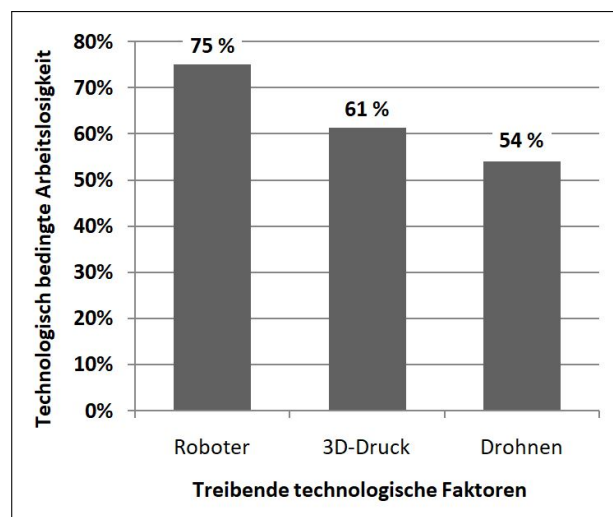


Abb. 3.3: Treibende Faktoren technologisch bedingter Arbeitslosigkeit (eigenes Diagramm nach Daheim & Wintermann 2016, S. 14)

Entsprechende Maschinen und Werkzeuge sind im Zuge der Digitalisierung immer mehr in der Lage Funktionen von Facharbeiterinnen und Facharbeitern zu übernehmen (vgl. Hacker 2014, S. 108). Im Rahmen einer Delphi-Studie aus dem Jahr 2016 wurde dies bestätigt. Mögliche Automatisierungspotenziale wurden dort von den Probandinnen und Probanden der Umfrage insbesondere durch die Nennung von Robotern mit 75 % bzw. durch additive Fertigungsverfahren mit 61 % aufgeführt (vgl. Abb. 3.3). Auf die Frage, welche digitalen Technologien in Zukunft vermehrt dazu beitragen werden, Arbeiten von Menschen zu übernehmen, antworteten die Teilnehmerinnen und Teilnehmer ebenfalls, dass auch Drohnen

¹²Weitere Task-Varianten, wie *analytische* oder *interaktive Tasks* werden an dieser Stelle nicht weiter erläutert. Entsprechende Angaben können Dengler et al. (2014, S. 7) entnommen werden.

¹³Im *Task-Based-Approach* (TBA) aus dem Jahr 2003 werden Tasks in nur vier Typen eingeteilt: *Analytische und interaktive Nicht-Routine-Tasks*, *analytische und interaktive Routine-Tasks*, *manuelle Routine-Tasks* und *manuelle Nicht-Routine-Tasks* (vgl. Dengler et al. 2014, S. 7).

zu den entsprechenden treibenden Faktoren gehören (vgl. Daheim & Wintermann 2016, S. 14). Neben einer Bestimmung realitätsnaher Automatisierungsgrade gehen aus wissenschaftlicher Sicht ebenfalls die damit einhergehenden Umgestaltungen von Arbeitsprozessen einher (vgl. Schlick et al. 2018, S. 5).¹⁴ Offen bleibt die Frage, welche Aufgaben schließlich besser von Menschen oder Maschinen übernommen werden können bzw. welche Arbeiten am Ende übrig bleiben und welche Qualifikationen Fachkräfte infolge entsprechender Entwicklungen erwerben müssen (vgl. Jordan 2017, S. 237). Im Hinblick auf Tätigkeiten im Rahmen von Baustellenarbeiten wird diese Thematik erneut in Abschnitt 3.3.2: *Mensch-Maschine-Interaktionen auf Baustellen* aufgegriffen.

Substituierbarkeitspotenziale von Arbeitstätigkeiten

Bei *Substitutionen* handelt es sich i. A. um Ersetzungen (vgl. Müller 2012, S. 289), die auch auf Vorgänge menschlicher Arbeit bezogen werden können. Unterschieden werden kann dabei zwischen zwei übergeordneten paradigmatischen Modellen (vgl. Frenz et al. 2015, S. 13; Wischmann & Hartmann 2018, S. 2). Beim ersten Modell, dem *Automatisierungsszenario*, wird eine Substitution menschlicher Arbeit durch Technik in den Vordergrund gestellt. Das zweite Modell betrachtet Technik hingegen eher als Mittel zur Unterstützung und Verstärkung menschlicher Fähigkeiten. Es handelt sich dann um das sog. *Werkzeugszenario*. Generell handelt es sich bei Substituierbarkeitspotenzialen um die Anteile von Tätigkeiten, die schon heute potenziell von Computern oder computer-gesteuerten Maschinen erledigt werden können (vgl. Dengler & Matthes 2015a, S. 6; Dengler & Matthes 2015b, S. 2; Schork et al. 2017, S. 18; Dengler & Matthes 2018, S. 2).¹⁵ Dabei sind es insbesondere die zuvor genannten Routine-Tätigkeiten, die im Rahmen von Digitalisierungsprozessen und den damit einhergehenden Ersetzungen, eine wesentliche Rolle spielen. Ganze Berufe hingegen – so wie sie in der Studie von Frey & Osborne (2013) betrachtet wurden – sind i. d. R. nicht automatisierbar.¹⁶ Lediglich standardisierte Operationen und Handlungen können teilweise oder vollständig substituiert werden (vgl. Dengler & Matthes 2015a, S. 12; Hammermann & Stettes 2015, S. 64; Gensicke et al. 2016, S. 11; Bellmann 2017a, S. 6; Nagl et al. 2017, S. 5). Da Substituierbarkeitspotenziale ein wichtiger, aber keineswegs der einzige Erklärungsfaktor für Aussagen zu Beschäftigungsentwicklungen sind (vgl. Dengler & Matthes 2018, S. 10) und die technologischen Potenziale für einzelne Berufe ganz unterschiedliche Ausprägungen aufweisen (vgl. Kruppe et al. 2017, S. 5), werden im Rahmen des Forschungsvorhabens die Automatisierungswahrscheinlichkeiten von Berufen im Bauwesen genauer untersucht. Zuvor sind jedoch im folgenden Abschnitt übergeordnete Aspekte von Substituierbarkeiten thematisiert.

¹⁴Das Festlegen eines optimalen Automatisierungsgrad für Baustellen-tätigkeiten wird nicht vorgenommen, da sich die einflussnehmenden Faktoren im Zuge der Digitalisierung nicht nur sehr schnell ändern, sondern auch, weil sie darüber hinaus ebenfalls zu umfangreich und vielfältig sind.

¹⁵Das Substituierbarkeitspotenzial eines Einzelberufes wird berechnet, indem die Zahl der durch Computer ersetzbaren Kernanforderungen durch die gesamte Zahl der Kernanforderungen dividiert wird (vgl. Dengler & Matthes 2018, S. 5).

¹⁶Eine Übertragung der Studie von Frey & Osborne (2013) auf Deutschland kann in Bonin et al. (2015) nachgelesen werden.

3.2.2 Übergeordnete Substituierbarkeitsaspekte für Arbeitstätigkeiten

Im vorliegenden Abschnitt werden Aspekte der zuvor erläuterten Substituierbarkeit von Berufen in Kombination mit branchenspezifischen Besonderheiten aufgegriffen, die in bereits durchgeführten Untersuchungen erforscht wurden. Zu Beginn ist dafür der stetig voranschreitende Implementierungsprozess digitaler Neuentwicklungen in verschiedenen Berufssegmenten dargestellt. Anschließend wird daran anknüpfend ein globaler Überblick zu internationalen Studien erläutert. Am Ende dieses Abschnitts sind Aussagen aufgeführt, die belegen, dass nicht alle Tätigkeiten im Rahmen von Digitalisierungsprozessen vollständig ersetzbar sind. Im Hinblick auf Arbeitstätigkeiten auf Baustellen ist eine Auseinandersetzung mit potenziellen Substituierbarkeiten benachbarter Bereiche von großer Bedeutung. Dies betrifft nicht nur die eigentlichen Ersetzbarkeiten einzelner Routine-Tasks, sondern ebenfalls mögliche prognostizierende Aussagen zukünftiger Entwicklungen. Ziel des vorliegenden Abschnitts ist es, neben dem Aufzeigen allgemeiner Tendenzen möglicher Substitutionen und Automationen, ebenfalls die mit diesen Phänomenen einhergehenden Zusammenhänge darzustellen.

Stetig-sukzessiver Anstieg von Substitutionen in diversen Berufssegmenten

Die aufgrund der Digitalisierung anstehenden Veränderungen – z. B. durch Implementierungen additiver Fertigungsverfahren oder durch den Einsatz von Robotern – können in aufeinanderfolgenden Etappen definiert werden (vgl. PWC 2018, S. 1). Einer englischen Studie zufolge finden die in Abschnitt 2.2 dargestellten Entwicklungen anhand von drei Implementierungsschritten flächendeckend erst nach und nach statt (vgl. ebd.). Die erste Stufe, die sog. *Algorithm Wave*, erfasst die Automatisierung von einfachen, aber rechenintensiven Tätigkeiten, wie sie z. B. häufig im Finanzsektor zu finden sind. Dieser Abschnitt der Digitalisierung ist nach Auffassung der Autoren schon in vielen Bereichen angekommen. Die zweite Stufe beinhaltet die Automatisierung der bereits zuvor aufgeführten Routine-Tasks, darüber hinaus aber auch Kommunikations- und Informatisierungsprozesse. Dieser Abschnitt wird als *Augmentation Wave* bezeichnet. Die Verfasser der Studie gehen davon aus, dass diese Phase – die bereits begonnen hat – allerdings erst in den 2020er Jahren vollumfänglich realisiert sein wird. Die *Augmentation Wave* spielt im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens bei der Analyse der entsprechenden Arbeitstätigkeiten eine wesentliche Rolle. Sie kann in Abschnitt 3.3.2 im Hinblick auf immer stärkere Mensch-Maschine-Interaktionen innerhalb soziotechnischer Systeme verortet werden. Die dritte und letzte Automatisierungsphase – die ihre volle Entwicklung voraussichtlich erst in den 2030er Jahren erfährt – wird als *Autonomy Wave* bezeichnet. In dieser abschließenden Etappe geht es um die Automatisierung von körperlicher Arbeit, um die Geschicklichkeit von Maschinen und um bedarfsgerechte Verfahren in Produktion und Transport, bspw. beim autonomen Fahren (vgl. ebd.). Diese dritte Phase wird im vorliegenden Dokument im Hinblick auf *Cyberphysische Systeme* in Abschnitt 3.3.3 thematisiert.

Ein Anstieg der in Abschnitt 2.2 bereits dargestellten Trends, wird nicht nur durch die eigentlichen technischen Weiterentwicklungen an sich vorangetrieben, sondern auch durch die damit einhergehende immer weiter verbesserte Leistungsfähigkeit der für die jeweiligen Abläufe notwendigen Computer, sowie durch die Tatsache, dass menschliche Arbeitskräfte jedes Jahr teurer werden (vgl. Jordan 2017, S. 234). Die in der *Augmentation Wave* angesiedelten Arbeitshandlungen, wie bspw. das Ablesen und Überwachen von Maschinen oder das Transportieren, Lagern und Versenden von Produkten werden folglich immer weniger von menschlichen Arbeitskräften vollzogen (vgl. Beck & Nagel 2016, S. 13). Auch manuelle Arbeiten wie das Reparieren, Warten und Instandsetzen von Maschinen oder das Sichern von Anlagen gehen durch zunehmende Einbindungen von Computertechnologien ebenfalls zurück. Solche Abläufe – die auch für die Analyse von Baustellenarbeitsprozessen in Betracht zu ziehen sind – werden bereits heute von Maschinen übernommen (vgl. ebd). Nach Frey & Osborne (2013) handelt es sich übergeordnet insbesondere um die Bereiche des Transports, der Logistik, der Dienstleistungen und der Bürotätigkeiten (vgl. Frey & Osborne 2013, S. 4; Hammermann & Stettes 2015, S. 64). Unabhängig davon, welche Segmente letztendlich in Betracht gezogen werden, zu berücksichtigen ist in jedem Fall, dass technische Automatisierungspotenziale nicht mit möglichen Beschäftigungseffekten gleichzusetzen sind, da sich Arbeitsplätze vorerst verändern, ohne dass sie direkt ersetzt werden (vgl. Frenz et al. 2015, S. 12). So können, wie bereits erwähnt, Roboter zukünftig nicht nur viele manuelle Arbeiten – insbesondere wenn es sich um routinierte Tätigkeiten handelt – übernehmen (vgl. Jordan 2017, S. 29), sondern ebenfalls mit Facharbeiterinnen und Facharbeitern immer stärker interagieren (vgl. Gensicke et al. 2016, S. 11; Vogler-Ludwig et al. 2016, S. 13). Im Hinblick auf die im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens betrachteten Baustellenarbeitsprozessen sei an dieser Stelle noch einmal erwähnt, dass mit fortschreitender Digitalisierung insbesondere auch komplexere Tätigkeiten zunehmen werden (vgl. Vogler-Ludwig et al. 2016, S. 13; Bellmann 2017a, S. 7).

Aus einer der bekanntesten Studien zu Substituierbarkeiten von Berufen aus dem Jahr 2013 geht hervor, dass 47 % der amerikanischen Arbeitsplätze bis 2030 automatisiert werden könnten (vgl. Frey & Osborne 2013, Brzeski & Burk 2015, S. 2; Hammermann & Stettes 2015, S. 64; Gensicke et al. 2016, S. 11; Pfeiffer & Wesling 2016, S. 31; Bellmann 2017a, S. 6). Die Autoren haben sich im Rahmen ihrer Forschung insgesamt 702 Berufe angeschaut und für diese bestimmt, wie hoch der jeweilige Anteil von Tätigkeiten ist, die künftig von Computern erledigt werden können.¹⁷ Aus der Studie geht ebenfalls hervor, dass in den USA 9 % der Arbeitsplätze Tätigkeitsprofile mit einer hohen Automatisierungswahrscheinlichkeit aufweisen (vgl. Dengler & Matthes 2015a, S. 9). Obwohl manche Berufe vielleicht ganz verschwinden werden (vgl. Möller 2015, S. 7), sind massive Arbeitsplatzabbau-Szenarien jedoch vorerst nicht zu erwarten (vgl. Dengler & Matthes 2015a, S. 22). Welche Auswirkungen die Digitalisierung auf die Verhältnisse in Deutschland hat, wird in Abschnitt 3.2.3 fortgeführt.

¹⁷Das Vorgehen von Frey & Osborne (2013) kann in Bonin et al. (2015) nachgelesen werden.

Unverzichtbarkeit menschlicher Arbeitstätigkeiten bei teilautomatisierten Vorgängen

Trotz zunehmender Automationen im Rahmen der Digitalisierung gehen Experten davon aus, dass viele Berufe nicht vollständig ersetzt werden und dass menschliche Faktoren auch weiterhin unverzichtbar sind (vgl. Ganschar et al. 2013, S. 6; Schilcher & Diekmann 2014, S. 22; Brzeski & Burk 2015, S. 3; Dengler & Matthes 2015a, S. 22 und S. 24; Zuboff 2015, S. 269; Beck & Nagel 2016, S. 13; Pfeiffer & Wesling 2016, S. 31; Jordan 2017, S. 224; Kruppe et al. 2017, S. 5; Nagl et al. 2017, S. 1; Faber & Mertens 2018, S. 6; Scheer & Wachter 2018, S. 86). Obwohl vereinzelte Tätigkeiten – die bisher als nicht ersetzbar galten – in naher Zukunft von Robotern übernommen werden können (vgl. Dengler & Matthes 2018, S. 2), ist in der Fachliteratur ebenfalls die Rede davon, dass sich mit der aufkommenden Technisierung und den sich damit verändernden Berufsbildern auch neue Tätigkeiten und Abläufe ergeben (vgl. Dengler & Matthes 2015a, S. 24; Dengler & Matthes 2015b, S. 7; Beck & Nagel 2016, S. 13; BIBB 2017, S. 88). Häufig stecken die innovativen digitalen Technologien lediglich den Rahmen fest, in dem sich auch neue Freiräume für den Zuschnitt von Arbeitsplätzen und Berufen bieten (vgl. Dengler & Matthes 2015a, S. 24). So können digitale Werkzeuge, intelligente Systeme oder Computersimulationen, Wissens- und Entscheidungsprozesse verschiedene Vorgänge zwar unterstützen, aber häufig noch nicht vollständig ersetzen (vgl. Schilcher & Diekmann 2014, S. 22). Von möglichen Substitutionen wenig gefährdet sind insbesondere Tätigkeiten, die komplexe Wahrnehmungen bzw. sensomotorische Bearbeitungen beinhalten, oder die auf kognitiver, kreativer bzw. sozialer Intelligenz beruhen (vgl. Ganschar et al. 2013, S. 52; Möller 2015, S. 13; Pfeiffer & Wesling 2016, S. 31; Faber & Mertens 2018, S. 6). Überlegenheiten von Menschen werden sich in Zukunft insbesondere hinsichtlich Arbeitstätigkeiten mit nicht-formalisierbaren Wissensbestandteilen, mit hoher Flexibilität oder mit umfangreichen Problemlösungskompetenz-Anforderungen ergeben (vgl. Sonntag et al. 2012, S. 428; Ganschar et al. 2013, S. 53; Schilcher & Diekmann 2014, S. 21; Möller 2015, S. 13; Zuboff 2015, S. 269). Es wird deutlich, dass trotz vieler, bereits digitalisierter Prozesse, spezielle Tätigkeiten vorerst nicht ohne beruflich qualifizierte Fachkräfte durchgeführt werden können (vgl. Pfeiffer & Wesling 2016, S. 32). Dies gilt insbesondere auch für die nicht-routinemäßigen Abläufe auf Baustellen, da der Anteil branchenspezifischer Besonderheiten im Vergleich zu anderen Berufszweigen und Tätigkeitsbereichen dort deutlich höher ist (vgl. Wolter et al. 2015, S. 41). Entsprechende Aspekte werden insbesondere in Abschnitt 3.3.2: *Mensch-Maschine-Interaktionen auf Baustellen* und in Abschnitt 3.4: *Effekte der Digitalisierung auf baustellenspezifische Besonderheiten* weiterführend behandelt.

3.2.3 Substituierbarkeitspotenziale in Deutschland

Nach der im Jahr 2013 von Frey & Osborne in den USA veröffentlichten Studie zur Zukunft von 702 Berufen wurden auch in Deutschland wissenschaftliche Untersuchungen zu Substituierbarkeitspotenzialen angefertigt. Auszüge aus diesen Studien sind im vorliegenden Abschnitt aufgeführt. Bevor übergeordnete Erkenntnisse zu Automatisierungswahrscheinlichkeiten in der deutschen Berufslandschaft dargestellt werden, sind zuvor die für das Forschungsvorhaben relevanten Forschungsberichte, die seit 2015 erstellt wurden, einleitend aufgezeigt. Anknüpfend an die daraus entnommenen übergeordneten Fakten wird aufgeführt, dass Substituierbarkeitspotenziale nicht nur nach verschiedenen Berufssegmenten, sondern auch nach Qualifikationen und Anforderungsniveaus sowie nach diversen Tätigkeitsbereichen, unterschiedliche Ausprägungen aufzeigen. Die Inhalte des vorliegenden Abschnitts dienen neben einer weiteren Eingrenzung der bereits zuvor gewonnenen Erkenntnisse ebenfalls als Grundlage für die nachfolgenden Betrachtungen. Dies betrifft insbesondere die Untersuchungen zum soziotechnischen System *Baustelle* in Abschnitt 3.3.

Relevante Studien für Deutschland ab 2015

Die in diesem Abschnitt aufgeführten Informationen stammen im Wesentlichen aus Studien und Forschungsberichten, die nach 2015 in Deutschland erstellt wurden. Die Erkenntnisse der zuvor bereits erwähnten Veröffentlichung von Frey & Osborne (2013) sind im Auftrag des *Bundesministeriums für Arbeit und Soziales* vom *Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung* bereits 2015 auf Deutschland übertragen worden (vgl. Bonin et al. 2015). Neben diesem Forschungsbericht ist insbesondere die Veröffentlichung von Dengler & Matthes (2015a) zu nennen, bei der es sich in erster Linie um eine auf Deutschland bezogene Erweiterung der Studie von Frey & Osborne (2013) handelt. Die darin aufgeführten Erkenntnisse sind am *Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung (IAB)* entstanden.¹⁸ Neben diesen beiden Forschungsberichten stammen ebenfalls aus dem Jahr 2015 die Studie der *ING-DiBa* (vgl. Brzeski & Burk 2015) und der Forschungsbericht Nr. 468 zur Digitalisierung am Arbeitsplatz des *Bundesministeriums für Arbeit und Soziales* (vgl. Arnold et al. 2015). Auch internationale Studien haben die Substituierbarkeitspotenziale in der Bundesrepublik Deutschland unter die Lupe genommen. So wurde die in den USA angefertigte Studie des *McKinsey Global Institute* aus dem Jahre 2017 unter Berücksichtigung deutscher Verhältnisse erstellt (vgl. Windhagen et al. 2017). Auch die bereits zuvor erwähnte Studie des PWC (2018) – an der mehrheitlich Unternehmen aus England beteiligt waren – widmet sich global der Frage nach digitalen Effekten und somit auch nach Auswirkungen für die deutsche Wirtschaft.

¹⁸Angaben zu Substituierbarkeitspotenzialen innerhalb einzelner Bundesländer können der Internetseite des Instituts für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung (IAB) entnommen werden: www.iab.de/de/publikationen/regional

Übergeordnete Ergebnisse für Deutschland

Den zuvor aufgeführten Studien kann entnommen werden, dass in Deutschland flächendeckend 48 % aller Arbeitsstunden automatisierbar sind (vgl. Windhagen et al. 2017, S. 20).¹⁹ Etwa die Hälfte der Berufe in Deutschland unterliegen somit einem allgemeinen Automatisierungspotenzial. Da jedoch bei den meisten Arbeitstätigkeiten – wie bereits dargestellt – ein vollumfänglicher Austausch eines Berufes nicht ohne Weiteres möglich ist, bedeutet diese Aussage nicht, dass 48 % der deutschen Arbeitsplätze per se durch Roboter ersetzt werden. Bezieht man Aussagen zu Substituierbarkeitspotenzialen allerdings auf einzelne Tätigkeiten innerhalb von Berufen, so kann festgehalten werden, dass an den meisten Arbeitsplätzen zumindest Teile der Tätigkeiten bereits heute durch Maschinen oder Software ersetzbar sind. So weisen 62 % der deutschen Stellen mindestens 30 % solcher automatisierbaren Tätigkeiten auf (vgl. ebd., S. 19). Aus der Studie des *Zentrums für Europäische Wirtschaftsforschung* geht ergänzend hervor, dass 2015 in Deutschland 42 % der Beschäftigungsverhältnisse eine hohe Automatisierungswahrscheinlichkeit von größer als 70 % aufgewiesen haben (vgl. Dengler & Matthes 2015a, S. 9; Dengler & Matthes 2015b, S. 2; Bellmann 2017a, S. 6). Weiter kann für das Jahr 2016 konstatiert werden, dass ca. 25 % der Beschäftigten in Berufen arbeiten, in denen mindestens 70 % der anfallenden Tätigkeiten von Computern oder computergesteuerten Maschinen erledigt werden könnten (vgl. Nagl et al. 2017, S. 6; Dengler & Matthes 2018, S. 10). Darüber hinaus wurde festgestellt, dass etwa 10 bis 15 % der Beschäftigten in Deutschland – im Vergleich zu den bereits zuvor genannten 9 % in den USA – mit einem sehr hohen Substituierbarkeitspotenzial konfrontiert sind (vgl. Dengler & Matthes 2015a, S. 9 und S. 22).

Die Studie der ING-DiBa nennt mit 59 % Automatisierungswahrscheinlichkeit eine weit- aus höhere übergeordnete Ersetzbarkeit in Deutschland (vgl. Brzeski & Burk 2015, S. 1; Dengler & Matthes 2015a, S. 9; Dengler & Matthes 2015b, S. 2). Zu berücksichtigen ist dabei jedoch, dass es sich bei den Angaben um Wahrscheinlichkeiten und nicht um aktuell durchführbare Möglichkeiten, also nicht um Substituierbarkeitspotenziale handelt. Die in Großbritannien erstellte Studie aus einem Zusammenschluss mehrerer Unternehmen führt hingegen lediglich 37 % Automatisierungswahrscheinlichkeit für die Bundesrepublik Deutschland auf (vgl. PWC 2018, S. 2). Auch wenn konkrete Aussagen bei einem sich ständig wandelnden Forschungsbereich nur bedingt getätigt werden können, kann übergeordnet festgehalten werden, dass ca. die Hälfte der Berufe der deutschen Wirtschaft einem Substituierbarkeitspotenzial infolge Digitalisierung unterliegen. Wie sich diese Effekte auf das Bauwesen auswirken, wird in den nachfolgenden Abschnitten weiter behandelt.

¹⁹Diese Angabe entspricht den Berechnungen der amerikanischen Studie von Frey & Osborne (2013), die für die USA – wie bereits erwähnt – von einer Automatisierungswahrscheinlichkeit von 47 % ausgehen.

Substituierbarkeitspotenziale nach Berufssegmenten

In einigen der zuvor genannten Studien wurden neben den übergeordneten Analysen auch Substituierbarkeitspotenziale verschiedener Berufsbereiche untersucht. Abbildung 3.4 zeigt zusätzlich zu möglichen Ersetzbarkeiten im Berufssegment *Bau- und Ausbauberufe* ebenfalls drei weitere in Deutschland definierte und dem Bauwesen nahestehenden Teilspektoren. Alle vier dargestellten Segmente haben gemeinsam, dass sie auf die Herstellung von Produkten ausgerichtet sind. Daher können sie auch zu einem Berufssektor zusammengefasst und übergeordnet als *Produktionsberufe* verstanden werden (vgl. Bundesagentur für Arbeit 2015, S. 13).²⁰

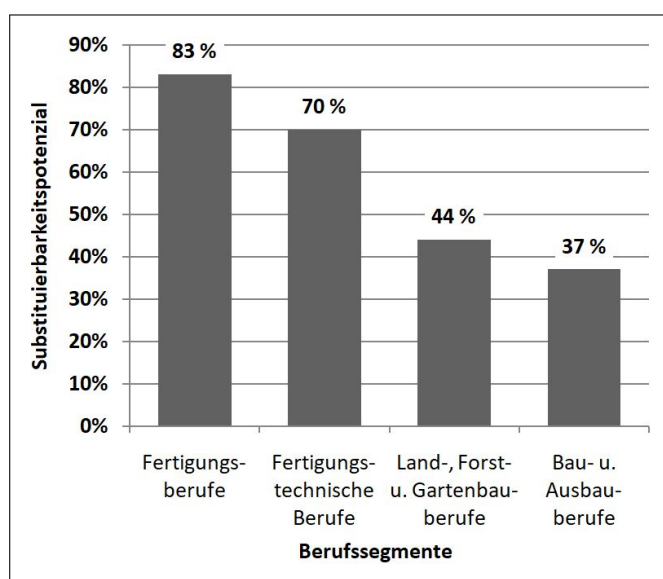


Abb. 3.4: Substituierbarkeitspotenzial nach Berufssegmenten (eigene Darstellung nach Dengler & Matthes 2018, S. 6)

auch Prozesse auf Baustellen stark von diversen Automatisierungseffekten betroffen. Generell liegt das Substituierbarkeitspotenzial des Berufssegments *Bau- und Ausbauberufe* mit rund 30 % dennoch unter dem zuvor genannten gesamtdeutschen Durchschnitt von ca. 50 % (vgl. Arnold et al. 2015, S. 18; Dengler & Matthes 2015a, S. 14). Die Studie der *ING-DiBa* aus dem Jahr 2015 weist im Vergleich zu den zuvor genannten Ergebnissen abweichende Werte auf (vgl. Brzeski & Burk 2015, S. 1). In Abbildung 3.5 ist zu erkennen, dass die Automatisierungswahrscheinlichkeit von Handwerksberufen mit 63 % über den zuvor angesprochenen 50 % liegt.

Durch den in Abb. 3.4 dargestellten Vergleich kann festgehalten werden, dass die Bau- und Ausbauberufe mit möglichen Substituierbarkeiten von 37 % gegenüber den drei weiteren aufgeführten Segmenten eher nachrangig zu betrachten sind. Die Tatsache jedoch, dass ein vergleichsweise niedriges Potenzial ermittelt wurde, bedeutet nicht, dass die Effekte der Digitalisierung für das Bauwesen eine untergeordnete Rolle spielen. So lag der hier dargestellte Wert von 37 % bei Berechnungen aus dem Jahr 2015 – die ebenfalls vom IAB durchgeführt wurden – noch bei 32,5 %. Wie in den Abschnitten 2.2 und 3.2.2 bereits aufgezeigt wurde, sind zukünftig eben nicht nur stationäre Bereiche, sondern

²⁰Welche Inhalte den jeweiligen Berufssegmenten zuzuordnen sind, kann in Bundesagentur für Arbeit (2015, S. 7-8) nachgelesen werden.

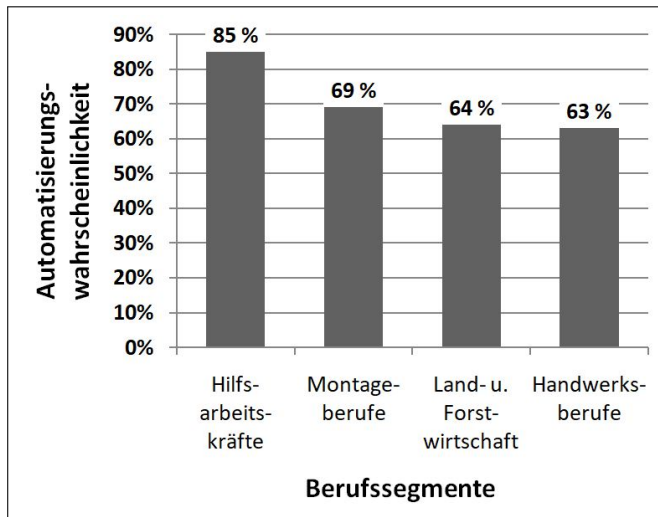


Abb. 3.5: Automatisierungswahrscheinlichkeiten verschiedener Berufssegmente (eigene Darstellung nach Brzeski & Burk 2015, S. 1)

Bei den Angaben von Brzeski & Burk (2015) müssen im Vergleich zu den Werten des IAB jedoch zwei grundlegende Unterschiede berücksichtigt werden. Nicht nur, dass andere Segmentbezeichnungen gewählt wurden, auch handelt es sich bei den Ergebnissen dieser Studie nicht um Substituierbarkeitspotenziale, sondern – wie zuvor bereits erwähnt – um Wahrscheinlichkeiten von Automatisierungen. Die in Abb. 3.5 dargestellten Angaben beziehen sich demnach nicht auf aktuelle Verhältnisse sondern auf Effekte, die erst im Jahr 2030 zu erwarten sind. Die unterschiedliche Einteilung im Hinblick auf die zuvor dargestellten Werte von Dengler &

Matthes (2018) in Abb. 3.4 machen einen direkten Vergleich der jeweiligen Daten daher nicht möglich. Festzuhalten bleibt jedoch, dass auch bei antizipierenden Angaben die Handwerksberufe im Vergleich zu anderen, i. d. R. stationären Bereichen, weniger stark der Digitalisierung unterliegen. Die entsprechenden zugehörigen und maßgebenden Effekte werden in Abschnitt 3.4 im Kontext zu Baustellentätigkeiten und den damit einhergehenden Besonderheiten weiterführend thematisiert. Auf die Säule *Hilfsarbeitskräfte* in Abb. 3.5 mit insgesamt 85 % Automatisierungswahrscheinlichkeit wird im nachfolgenden Abschnitt noch genauer eingegangen.

Substituierbarkeitspotenziale nach Qualifikation und Anforderungsniveau

Zusätzlich zur vorherigen Betrachtung verschiedener Berufssegmente ist ebenfalls eine Analyse innerhalb des Berufssegments *Bau und Ausbau* im Hinblick auf differente Anforderungsniveaus überaus relevant (vgl. Arnold et al. 2015, S. 18). Grundlegend können im Rahmen entsprechender Untersuchungen die vier Gruppen *Expert/-innen*, *Spezialist/-innen*, *Fachkräfte* und *Helfer/-innen* klassifiziert werden (vgl. Dengler & Matthes 2018, S. 5). Bei den Expertinnen und Experten handelt es sich um Personen, die mindestens ein vierjähriges Hochschulstudium abgeschlossen haben. Die Gruppe der Spezialistinnen und Spezialisten schließt Menschen mit ein, die eine Meister- oder Techniker Ausbildung nachweisen können bzw. einen weiterführenden Fachschul- oder Bachelorabschluss besitzen. Die Kategorie der Fachkräfte umfasst die im vorliegenden Forschungsvorhaben berücksichtigte Gruppe von Personen, die mindestens eine zweijährige Berufsausbildung oder einen berufsqualifizierenden Abschluss an einer Berufsfach- oder Kollegschule vorlegen

können. Bei der letzten Klasse handelt es sich um die Gruppe der Helferinnen und Helfer, die keine oder nur eine einjährige Berufsausbildung absolviert haben (vgl. ebd.). Aus den zuvor genannten Studien kann entnommen werden, dass im Hinblick auf die hier dargestellte Klassifizierung ein entsprechend höheres Anforderungsniveau ein niedrigeres Substituierbarkeitspotenzial aufweist, als ein geringes Niveau (vgl. Arnold et al. 2015, S. 17; Dengler & Matthes 2015a, S. 15; Frenz et al. 2015, S. 13; Bellmann 2017a, S. 7; Nagl et al. 2017, S. 23). Schätzungen zufolge können bspw. 62 % bis 77 % der Arbeitsstunden von Geringqualifizierten automatisiert werden (vgl. Windhagen et al. 2017, o. S.). Abb. 3.6 zeigt mit 58 % ähnlich hohe Werte.

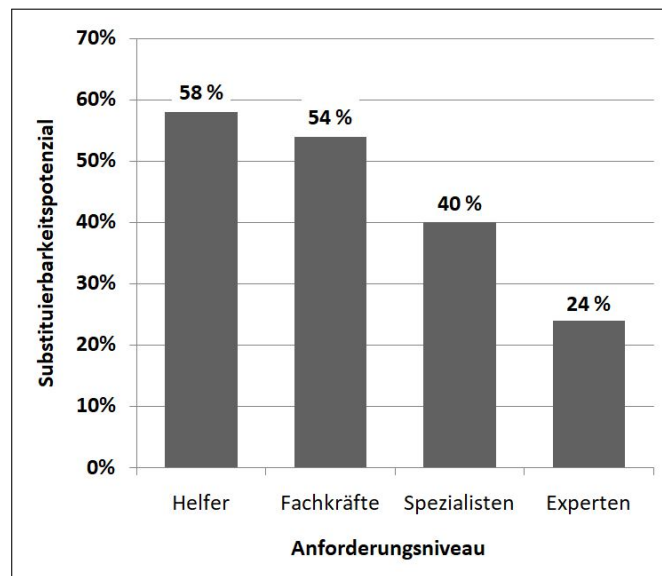


Abb. 3.6: Substituierbarkeitspotenzial nach Anforderungsniveau (eigene Darstellung nach Dengler & Matthes 2018, S. 1)

Während die Substituierbarkeitspotenziale bei Spezialistenberufen mit 40 % und bei Expertenberufen mit 24 % vergleichsweise gering sind (vgl. Dengler & Matthes 2018, S. 5), weisen insbesondere die beiden Gruppen der Fachkräfte und Helfer/-innen deutlich höhere Werte auf (vgl. Dengler & Matthes 2015a, S. 12 und S. 22; Dengler & Matthes 2015b, S. 4). Dass diese beiden Werte mit 58 % und 54 % so nah beieinander liegen, resultiert in erster Linie daraus, dass die mit den Facharbeiten stets verbundenen Helfertätigkeiten, die aufgrund der vielfältigen und projektspezifischen Aufgaben häufig zu einem großen Teil aus Nicht-Routine-Abläufen bestehen, ebenfalls weniger leicht

automatisierbar sind (vgl. Dengler & Matthes 2015a, S. 12; Dengler & Matthes 2015b, S. 4). Auch wenn dies – wie in Abschnitt 3.2.4 noch genauer erläutert wird – verstärkt für Prozesse auf Baustellen gilt, kann übergeordnet dennoch festgehalten werden, dass Substituierbarkeitspotenziale zukünftig auch für Helfer- und Fachkrafttätigkeiten infolge Digitalisierung immer weiter zunehmen werden. So wurde diesbezüglich bereits zwischen den Jahren 2013 und 2016 bei Fachkräften eine Zunahme von 45 % auf die in Abbildung 3.6 dargestellten 54 % verzeichnet (vgl. Dengler & Matthes 2015b, S. 1; Dengler & Matthes 2018, S. 5 und S. 10). Bevor Änderungen durch die Einbindung digitaler Arbeits- und Hilfsmittel explizit für das Bauwesen betrachtet werden, sind nachfolgend branchenübergreifende Tätigkeitsbereiche im Hinblick auf Substituierbarkeitspotenziale erörtert.

Substituierbarkeitspotenziale nach Tätigkeiten

Neben der Analyse von Substituierbarkeiten im Hinblick auf Berufssegmente und Anforderungsniveaus, sind mögliche Ersetzbarkeiten von Baustellenarbeitsprozessen ebenfalls auf Potenziale unterschiedlicher Tätigkeitsfeldern hin analysierbar. Abb. 3.7 zeigt diesbezüglich sieben verschiedene Arbeitsbereiche. Für die Inhalte des vorliegenden Forschungsvorhabens kommen dabei insbesondere fünf Arbeitskategorien in Frage: *Fachkenntnis*, *unvorhersehbare körperliche Tätigkeiten*, *Datenerfassung*, *Datenverarbeitung* und *vorhersehbare körperliche Tätigkeiten*. Die drei letzten Bereiche haben nach heutigem Stand der Technik das größte Automatisierungspotenzial. Insgesamt machen sie mehr als die Hälfte aller Arbeitsstunden in Deutschland aus (vgl. Windhagen et al. 2017, S. 19).

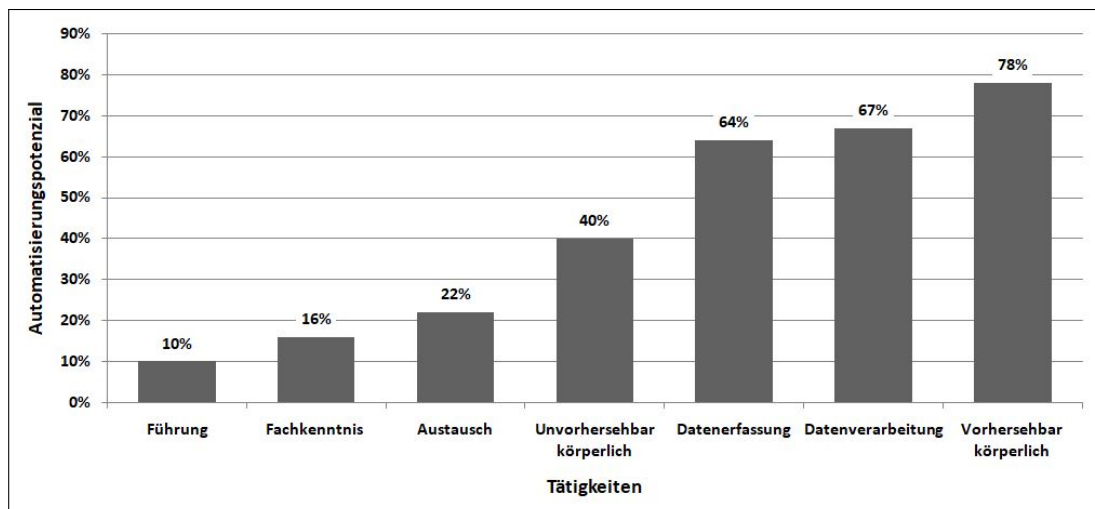


Abb. 3.7: Automatisierungspotenzial nach Tätigkeiten (eigene Darstellung nach Windhagen et al. 2017, S. 20)

Lässt man die beiden Tätigkeitsfelder Führung und Austausch einmal außen vor, so sind es neben der als relativ gering anzusehenden Ersetzbarkeit von Fachkenntnissen, insbesondere die körperlichen Arbeiten (vorhersehbar und unvorhersehbar) sowie die Informatisierungsprozesse (Datenerfassung und Datenverarbeitung), die vergleichsweise hohe Automatisierungspotenziale aufweisen. Auch wenn die hier angegebenen möglichen Substitutionen von 64 % und 67 % anschaulich zu großen Teilen automatisiert werden können, müssen für das Bauwesen wiederum gesonderte Betrachtungen vorgenommen werden. So wird, wie bereits in Abschnitt 3.1.1 gezeigt, die Informatisierung insbesondere durch die Methode BIM eher verstärkt zu- als abnehmen. Diese Tatsachen sind im Hinblick auf Qualifikationen für das Ausführen von Tätigkeiten auf Baustellen, z. B. hinsichtlich einer digital orientierten Baustellendokumentation, stets zu berücksichtigen.

Aus den übergeordneten Erkenntnissen zu Substituierbarkeiten in Deutschland, die im vorliegenden Abschnitt hinsichtlich Berufssegmenten, Anforderungsniveaus und Arbeitstätigkeitsbereichen unterschieden wurden, kann festgehalten werden, dass Vorgänge auf Baustellen im Vergleich zu anderen Branchen zwar einer weniger starken Automatisierung unterliegen, aber dennoch, wie bspw. in Abschnitt 2.2 gezeigt, zukünftig erheblichen Substituierbarkeitseffekten, z. B. infolge weiterer technologischer Entwicklungen ausgesetzt sind.

3.2.4 Automatisierungswahrscheinlichkeiten im Bauhandwerk

Die zuvor aufgeführten und als übergeordnet anzusehenden Substituierbarkeitspotenziale und Automatisierungswahrscheinlichkeiten werden im vorliegenden Abschnitt vertiefend für das Bauhandwerk betrachtet. Dafür sind die entsprechenden Auswirkungen der Digitalisierung zuerst auf das gesamte Bauwesen und daran anschließend explizit für ausgewählte Handwerksberufe dargestellt. Bevor mögliche Ersetzbarkeiten innerhalb von Bau- und Ausbauberufen anhand der bereits zuvor aufgeführten Klassifizierung nach Anforderungsniveaus behandelt werden, enthält der vorliegende Abschnitt einen allgemeinen Überblick über mögliche Automatisierungen im Rahmen der Digitalisierung des Bauwesens. Ziel des vorliegenden Abschnittes ist es, neben einer Übersicht über anstehende Substitutionen, ebenfalls die in den zuvor genannten Studien wenig berücksichtigten branchenspezifischen Aspekte des Baugewerbes aufzuzeigen.

Status quo der Automatisierungswahrscheinlichkeiten im Bauwesen

Obwohl die in Abschnitt 3.2.3 dargestellten Studien das Bauhandwerk größtenteils nur in geringem Maße berücksichtigen (vgl. Pfeiffer & Wesling 2016, S. 31), konnten aus den bisher durchgeführten Untersuchungen dennoch Erkenntnisse gewonnen werden, die für die Analyse möglicher Automationen auf Baustellen überaus relevant sind. Zieht man bei den bereits erstellten Prognosen potenzielle Substitutionen innerhalb des gesamten Bausektors heran, so variieren die in den Studien gemachten Angaben von ca. 20 % (vgl. Dengler et al. 2018, S. 3) bis hin zu ca. 40 % (vgl. PWC 2018, S. 19). Für das Nachbarland Österreich wird sogar von einer Automatisierungswahrscheinlichkeit der Berufsgruppe Bau- und Ausbaufachkräfte von 63 % gesprochen (vgl. Nagl et al. 2017, S. 19). Neben Prozentangaben wurden in den gesichteten Forschungsberichten auch absolute Werte genannt. So könnten nach einer englischen Studie bei einem rasanten technischen Wandel zwischen den Jahren 2020 und 2040 über 600.000 Arbeitsplätze im Bausektor wegfallen (vgl. Mace 2017, S. 11).

Die in Abschnitt 3.2.3 aufgezeigten Unterschiede nach Anforderungsniveaus (Experten, Spezialisten, Fachkräfte und Helfer) können, wie bereits erwähnt, nicht unmittelbar auf das Bauwesen übertragen werden (vgl. Dengler & Matthes 2015a, S. 15). Im Gegensatz zu den dargestellten Erkenntnissen ist es nicht die Gruppe der Helfer/-innen, die dem größten Substituierbarkeitspotenzial unterliegen. Wie in Abb. 3.8 zu erkennen ist, haben sie sogar das niedrigste Substituierbarkeitspotenzial, während Spezialistinnen und Spezialisten noch höheren Ersetzbarkeiten ausgesetzt sind, als die im Forschungsvorhaben betrachteten Fachkräfte. Erklärt werden kann dieser Effekt v. a. mit den technologischen Möglichkeiten, die sich bereits heute durch den Einsatz von Computern bei der Planung und Berechnung von Bauwerken ergeben, insbesondere durch Nutzung von CAD (vgl. Arnold et al. 2015, S. 18; Dengler & Matthes 2015a, S. 16). Da es sich bei der Gruppe der *Spezialist/-innen* häufig um Berufsbilder wie *Bautechniker/-innen*, *Bauzeichner/-innen* oder *Konstrukteur/-innen* handelt, können viele der dort angesiedelten Tätigkeiten überwiegend von Computern oder Software-Programmen übernommen werden.

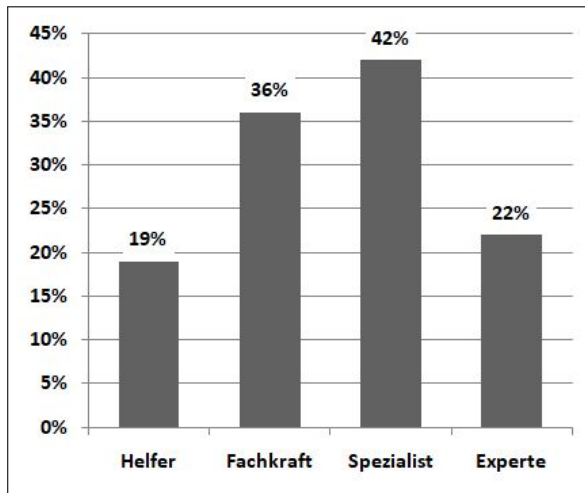


Abb. 3.8: Substituierbarkeitspotenziale nach Anforderungsniveau von Bau- und Ausbauberufen (eigene Darstellung nach Dengler & Matthes 2015a, S. 16)

Dass die Gruppe der Helferinnen und Helfer das niedrigste Substituierbarkeitspotenzial von 19 % aufweisen, liegt v. a. in den bereits angedeuteten Besonderheiten des Bauwesens. Anders als bei Herstellungen von Produkten in stationären Umgebungen, müssen Hilfsarbeitskräfte auf Baustellen häufig Arbeiten ausführen, die stets an die unikale Planung des Bauvorhabens und an die örtlichen Gegebenheiten gebunden sind.²¹ Zu diesen Tätigkeiten zählen nicht nur die eigentlichen Vorgänge zur Errichtung von Bauwerken, sondern auch sämtliche damit verbundene Nebenprozesse. So ist es bspw. nicht nur erforderlich alle notwendigen Materialien sinnvoll und effektiv zu lagern, sondern darüber hinaus ist es auch ebenso wichtig, dass Baustellen stets den geforderten Sicherheitsan-

sprüchen genügen. Die mannigfaltigen Vorgänge unterliegen aufgrund der Objektvielfalt von Bauvorhaben somit einer stetigen Anpassung an örtliche Gegebenheiten. Neben dem hier skizzierten übergeordneten Vergleich der Substituierbarkeiten im Bauwesen nach Anforderungsniveaus werden nachfolgend explizit Tätigkeiten innerhalb der Branche – inkl. den der Bauausführung vorgelagerten Prozessen der Bauplanung – betrachtet.

Automatisierungswahrscheinlichkeiten von Routine-Tätigkeiten im Bauwesen

In Tabelle 3.1 sind in der linken Spalte die bereits in Abschnitt 3.2.1 erwähnten und in Dengler & Matthes (2015a) genannten fünf Routine- bzw. Nicht-Routine-Tasks aufgelistet (vgl. ebd., S. 8). Die zweite Spalte beinhaltet aus der Literatur entnommene Beispiele für eben diese Kategorien, während in der dritten Spalte exemplarisch dargestellt ist, welche Tätigkeiten innerhalb des Bauwesens den einzelnen Tasks zugeordnet werden können.

Betrachtet man die Zeilen von Tabelle 3.1, so kann übergeordnet zwischen Routine- und Nicht-Routine-Tasks unterschieden werden. Neben den *analytischen* und *interaktiven Nicht-Routine-Tätigkeiten*, sind zudem die auf wiederholenden Prozessen bezogenen *kognitiven* und *manuellen Routine-Tasks* aufgeführt. Die letzte Zeile beinhaltet die für das vorliegende Forschungsvorhaben relevanten *manuellen Nicht-Routine-Tasks*.

²¹Besonderheiten des Bauens werden im Hinblick auf Effekte der Digitalisierung in Abschnitt 3.4 behandelt.

Tab. 3.1: Allgemeine und auf Baustellen bezogenen Beispiele von Routine- und Nicht-Routine-Tasks (eigene Tabelle nach Dengler et al. 2014, S. 7 und Dengler & Matthes 2015a S. 8)

Bezeichnungen der Routine und Nicht-Routine-Tasks	Allgemeine Task-Beispiele	Task-Beispiele für Baustellentätigkeiten
Analytische Nicht-Routine-Tasks (durch Computer bzw. Maschinen unterstützbar)	Analysieren, Planen, Konstruieren, Entwerfen, Vorschriften ausarbeiten, Regeln anwenden und interpretieren	„Bauingenieur-Tasks“ (z. B. Bewehrungsabnahmen, Mängelfeststellungen)
Interaktive Nicht-Routine-Tasks (durch Computer bzw. Maschinen unterstützbar)	Verhandeln, Interessen vertreten, Koordinieren, Organisieren, Personal beschäftigen oder managen	„Bauleiter-Tasks“ (z. B. Management-Tätigkeiten, Beratungen auf der Baustelle, Baubesprechungen)
Kognitive Routine-Tasks (durch Computer bzw. Maschinen ersetzbar)	Kalkulieren, Texte und Daten korrigieren, Messungen vornehmen	„Polier-Tasks“ (z. B. Anweisungen geben, Dokumentieren, Reagieren auf Unvorhersehbares)
Manuelle Routine-Tasks (durch Computer bzw. Maschinen ersetzbar)	Maschinen bedienen, kontrollieren oder ausstatten	bei Baustellenarbeitsprozessen nur bedingt vorhanden
Manuelle Nicht-Routine-Tasks (nicht durch Computer bzw. Maschinen ersetzbar)	Reparieren oder Renovieren von Häusern, Maschinen oder Fahrzeugen	„Baufacharbeiter-Tasks“ (z. B. Schalen, Bewehren, Betonieren, Reinigen, Sortieren)

In der dritten Spalte stellen die aufgeführten Beispiele arbeitsbereichsübergreifend dar, welche Tätigkeiten innerhalb des Bauwesens den jeweiligen Tasks zugeordnet werden können.²² Für die *Analytischen Nicht-Routine-Tasks* in der ersten Zeile können Vorgänge genannt werden, die nur temporär auf Baustellen stattfinden. So sind bspw. Prüfingenieurinnen und Prüfingenieure i. d. R. nur zu diversen Zeitpunkten vor Ort, z. B. wenn Bewehrungsabnahmen stattfinden. Entsprechende Tasks sind durch Computer lediglich unterstützbar. Auch die Aufgaben von Bauleiterinnen und Bauleitern, deren Tätigkeiten übergeordnet zu den *Interaktiven Nicht-Routine-Tasks* gezählt werden können und die ebenfalls nur zeitweise auf Baustellen stattfinden, z. B. wenn Baubesprechungen angesetzt werden, sind nicht vollumfänglich von Computern ersetzbar.

²²Die Angaben in der Tabelle dienen lediglich einer übergeordneten Einteilung; sie stellen keinesfalls trennscharfe Zuweisungen dar.

Die *Kognitiven Routine-Tasks* hingegen – denen in Tab. 3.1 Poliere zugeordnet sind – beinhalten Tätigkeiten, die zwar ebenfalls nur vereinzelt oder unvorhergesehen, dafür aber öfters auftreten können. Als Beispiele dienen nicht geplante Situationen, in denen Poliere vor Ort Entscheidungen ad hoc treffen müssen, damit die Ausführungsarbeiten nicht unterbrochen bzw. fachlich korrekt ausgeführt werden. Zu diesen Tasks zählen auch die bereits thematisierten Dokumentationsvorgänge, wie z. B. das Festhalten projektrelevanter Meilensteine oder das Aufzeichnen von Arbeitszeiten. Diese *Poliertätigkeiten* sind v. a. im Hinblick auf Aufzeichnungen weitestgehend durch Computer ersetzbar. Die in der vorletzten Zeile aufgeführten *Manuellen Routine-Tasks*, die durch Computer bzw. Maschinen substituierbar sind, treten – wie bereits zuvor angedeutet – bei Baustellenarbeitsprozessen nur bedingt auf. Entsprechende Tätigkeiten spiegeln eher die Vorgänge innerhalb stationärer Herstellprozesse wider. Solche standardisierten und repetitiven Tätigkeiten, die teilweise oder sogar voll und ganz von computergesteuerten Maschinen übernommen werden können, sind jedoch aufgrund möglicher Automatisierbarkeiten in Zukunft immer weniger notwendig (vgl. Hammermann & Stettes 2015, S. 73; Wolter et al. 2015, S. 14; Bellmann 2017b, S. 6; Krabel 2017, S. 99; Nagl et al. 2017, S. 3; Hafner & Berlack 2018, S. 53).

Vorgänge auf Baustellen unterliegen hingegen nur selten entsprechenden, sich wiederholenden Abläufen, so dass Automatisierungen weniger stark als bei routinierten Handlungen möglich sind. Beispielsweise fallen Mauerwerksarbeiten nur bedingt in eine Kategorie repetitiver Vorgänge, da u. a. Mauerwerksverbände in der Theorie zwar immer gleich geplant werden können, aber in der Praxis vor Ort an geforderte Abmessungen stets anzupassen sind. Auch das in Tab. 3.1 den routinierten Tasks zugehörige Beispiel zum Bedienen von Maschinen stellt sich auf Baustellen, z. B. aufgrund unterschiedlicher topologischer Geländeverläufe oder durch Berücksichtigung diverser Baufortschritte, stets als sehr vielfältig dar. So sind beim Fahren eines Baggers oder beim Steuern eines Turmdrehkrans immer auch die Gegebenheiten vor Ort zu beachten. Baustellentätigkeiten können somit generell der untersten Kategorie, den *Manuellen Nicht-Routine-Tasks*, zugeordnet werden.

Es handelt sich i. d. R. um Vorgänge, die ein ständiges Abwägen der vorzufindenden Situationen verlangen. So sind beim Schalen, Bewehren und Betonieren einer Stahlbetonwand nicht nur die geometrischen Rahmenbedingungen einzuhalten, sondern es sind auch die zugehörigen konstruktiven Vorgaben, z. B. Stababstände oder Betondeckungen, stets zu berücksichtigen. Auch vielfältige Aspekte von Arbeitsprozessen, z. B. ein Kontrollieren der Schalung vor dem Betonieren oder das Einhalten der jeweiligen Betoniergeschwindigkeiten, sind im Rahmen von Baustellenvorgängen von großer Bedeutung. Festzuhalten bleibt, dass viele Tätigkeiten den *Manuellen Nicht-Routine-Tasks* zugeordnet werden können.

Substituierbarkeitspotenziale nach Anforderungsniveaus von Bau- und Ausbauberufen

Betrachtet man Automatisierungen nach den bereits in Abschnitt 3.2.3 genannten Anforderungsniveaus explizit für das Bauwesen, so muss über die dort gemachten Angaben hinaus spezifiziert werden, welchem Bereich welche Tätigkeiten zuzuweisen sind.

Tab. 3.2: Substituierbarkeitspotenziale nach Berufshauptgruppen und Anforderungsniveau (eigene Tabelle nach Dengler & Matthes 2015a, S. 28)

Berufshauptgruppe	Anforderungsniveau	Substituierbarkeitspotential [%]
Bauplanung, Architektur, Vermessungsberufe	Helfer	a
	Fachkraft	52,4
	Spezialist	44,1
	Experte	21,0
Hoch- u. Tiefbauberufe	Helfer	10,0
	Fachkraft	4,2
	Spezialist	24,7
	Experte	9,2
(Innen-) Ausbauberufe	Helfer	19,0
	Fachkraft	28,6
	Spezialist	26,7
	Experte	a

Übergeordnet kann bei Bau- und Ausbauberufen zwischen vier Kategorien, den *Bauplanungs-, Architektur- u. Vermessungsberufen*, den *Hoch- u. Tiefbauberufen*, den *Innen- bzw. Ausbauberufen* sowie den *Gebäude- u. versorgungstechnischen Berufen* unterschieden werden (vgl. Bundesagentur für Arbeit 2015, S. 8-9).²³ In Tabelle 3.2 sind drei dieser Gruppen aufgeführt.²⁴ Generell weisen – bis auf ein Niveau – alle Kategorien im Vergleich zum allgemeinen Durchschnitt in der Bundesrepublik von 50 % geringere Substituierbarkeitspotenziale auf (vgl. Dengler & Matthes 2015a, S. 28). Für die weiteren Betrachtungen im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens sind insbesondere die Angaben der zweiten Kategorie in Tab. 3.2 interessant. Auf den ersten Blick fällt auf, dass sich das Anforderungsniveau der Spezialistinnen und Spezialisten bei den Hoch- und Tiefbauberufen stark von den anderen Angaben unterscheidet. Dies kann hier – wie zuvor bereits thematisiert –

damit erklärt werden, dass es sich hauptsächlich um Tätigkeiten handelt, die automatisierbar sind. Insbesondere trifft dies auf die zuvor erörterten *Interaktive Nicht-Routine-Tasks* bzw. *Kognitive Routine-Tasks* zu. Diese können bspw. im Rahmen von Angebots-erstellungen, von Baustellenvorbereitungen oder von Bauüberwachungen in Form von Tabellenkalkulationen, EDV-basierter Datenaustausch-Szenarien oder mithilfe computergestützter Konstruktionsarbeiten umgesetzt werden. Die Gruppe der Fachkräfte weist mit 4,2 % ein sehr geringes Substituierbarkeitspotenzial auf. Diese Angabe kann – im Rückblick auf die bereits dargestellten vielfältigen Faktoren – im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens bestätigt werden.

²³Die Kennzeichnung *a* in Tab. 3.2 wurde aus Dengler & Matthes (2015a) übernommen. Die Angabe weist darauf hin, dass keine Einzelberufe für diese Berufshauptgruppen-Anforderungsniveau-Kombination existieren (vgl. ebd., S. 31).

²⁴Die Gruppe der *Gebäude- und versorgungstechnischen Berufe* wurde nicht aufgeführt, da sie für das Errichten von Bauwerken weniger relevant ist.

Automatisierungswahrscheinlichkeiten einzelner Berufe des Bauwesens

In der bereits angesprochenen Studie von Frey & Osborne (2013) sind in den USA insgesamt 702 Berufe im Hinblick auf mögliche Automatisierungen untersucht worden. Tab. 3.3 zeigt 13 ausgewählte Berufe des Bauwesens, die während dieses Forschungsvorhabens an der *University of Oxford* analysiert wurden.²⁵

Tab. 3.3: Automatisierungswahrscheinlichkeiten ausgewählter Berufe des Bauwesens nach Frey & Osborne (2013, S. 61-77)

Berufsbezeichnung	Automatisierungswahrscheinlichkeit	Rang (von insg. 702 Berufen)
Projektleiterin/Projektleiter	1,7 %	78
Bauingenieurin/ Bauingenieur	1,9 %	84
Bauleiterin/Bauleiter	7,1 %	154
Bauzeichnerin/Bauzeichner	52 %	305
Zimmerin/Zimmerer	72 %	398
Malerin/Maler	75 %	411
Bautechnikerin/Bautechniker	75 %	413
Trockenbauerin/Trockenbauer	79 %	433
Maurerin/Maurer	82 %	455
Stuckateurin/Stuckateur	84 %	475
Baufacharbeiterin/Baufacharbeiter	88 %	512
Dachdeckerin/Dachdecker	90 %	535
Betonverarbeiterin/Betonverarbeiter	94 %	595

Um eine bessere Einschätzung der Veränderungen auf Baustellen innerhalb des Bauwesens vornehmen zu können, werden Handwerksberufe ins Verhältnis zu anderen ausgewählten Arbeitsfeldern der Bauplanung und -ausführung gesetzt. Dafür sind neben den Prozentangaben aus der Studie von Frey & Osborne (2013) ebenfalls die entsprechenden Ränge der einzelnen Berufe angegeben. Die ersten drei Berufe weisen jeweils geringe Wahrscheinlichkeiten für mögliche Ersetzbarkeiten infolge Digitalisierung auf. So kann festgehalten werden, dass im Hinblick auf die Tätigkeiten von *Projektleiter/-innen*, *Bauingenieur/-innen* und *Bauleiter/-innen* die Automatisierungswahrscheinlichkeiten unter 10 % liegen (vgl. Mace 2017, S. 10). Dies hängt sehr stark mit den bereits zuvor erläuterten Aufgabenbereichen zusammen. So handelt es sich bei den Tätigkeiten innerhalb der drei aufgeführten Berufe größtenteils um Handlungen, die im Management-Bereich verortet werden können, indem die Tätigkeiten wiederum nur teilweise durch

²⁵Die in der Tabelle angegebenen Berufsbezeichnungen wurden aus dem Englischen übersetzt. Sie entsprechen in großen Teilen den deutschen Bezeichnungen, werden hier aber nur verkürzt und ohne weitere inhaltliche Abgleiche aufgeführt. Sie geben somit nicht die offiziellen Berufsbezeichnungen des deutschen Bildungssystems wieder.

Computer bzw. Maschinen ersetzbar sind (s. Tab. 3.1). Betrachtet man die weiteren Berufe, die in Tabelle 3.3 aufgeführt sind, so kann mit Angabe der Berufsbezeichnung *Bauzeichner/-in* festgestellt werden, dass die Automatisierungswahrscheinlichkeit dort bereits bei über 50 % liegt. Dass dieser Wert wie auch bei den darauf folgenden Berufen sehr viel höher liegt als das zuvor von Dengler & Matthes (2018) genannte Substituierbarkeitspotenzial für Bau- und Ausbauberufe von 37 % (vgl. Abb. 3.4), hängt in erster Linie damit zusammen, dass es sich bei der Studie von Frey & Osborne (2013) um Wahrscheinlichkeiten für das Jahr 2030, und nicht um aktuell mögliche Ersetzbarkeiten handelt. Da es ebenfalls Angaben aus zwei verschiedenen Ländern sind, müssen bei entsprechenden Vergleichen stets auch nationale Gegebenheiten berücksichtigt werden.

Der erste auf der Baustelle verortete Beruf in Tab. 3.3 ist mit 72 % der Beruf *Zimmer/-in*, dicht gefolgt vom Beruf der *Maler/-in* mit 75 %. Ebenfalls 75 % weist auch der Beruf *Bautechniker/-in* auf. Da viele Tätigkeiten von Bautechnikerinnen und Bautechnikern oder Polierinnen und Polieren – wie zuvor in Tabelle 3.1 bereits dargestellt – als *Kognitive Routine-Tasks* aufgefasst werden können, sind die Automatisierungswahrscheinlichkeiten für diese Berufe ebenfalls hoch. Auch *Dachdecker/-innen* weisen mit 90 % schon sehr hohe Wahrscheinlichkeit auf. Dies ergibt sich vordergründig aus den sich repetitiven Effekten beim Decken von Dächern. So kann bspw. das sich wiederholende Aufeinanderlegen von Dachpfannen in großen Teilen automatisiert werden (vgl. Mace 2017, S. 10).²⁶

Für den Beruf *Maurer/-in* stellt sich für das Jahr 2030 nach Tab. 3.3 eine Automatisierungswahrscheinlichkeit von 82 % ein. Wie bereits zuvor aufgezeigt, handelt es sich beim Aufeinandersetzen von künstlichen Mauersteinen um repetitive Vorgänge, die an sich einer hohen Ersetzbarkeit unterliegen. So bieten sich bspw. Roboter fürs Mauern oder Putzen an (vgl. Glock 2018, S. 619; Haghsheno et al. 2019, S. 54). Angaben einer britischen Studie zufolge sind in England rund 70.000 Maurerinnen und Maurer beschäftigt. Bei einem schnell voranschreitenden technologischem Wandel werden für das Jahr 2040 schätzungsweise nur noch ca. 4.300 Maurerinnen und Maurer benötigt (vgl. Mace 2017, S. 13).

Betrachtet man deutsche Verhältnisse, so stellt die Tatsache, dass ca. 75 % der Wände im Wohnungsbau in Deutschland gemauert werden (vgl. Schach et al. 2017, S. 360), einen wichtigen Faktor im Hinblick auf mögliche Ersetzbarkeiten dar. Aussagen, dass der Beruf *Maurer/-in* in Zukunft nicht mehr benötigt wird (vgl. Brehm 2019, S. 93), sind derzeit noch genauso wenig konkret, wie die von Frey & Osborne (2013) gemachten Angaben in Tab. 3.3, dass im Jahr 2030 82 % weniger Tätigkeiten im Mauerwerksbau von Fachkräften ausgeführt werden müssen. Nach Angaben des IAB-Online-Portals *Futuromat*, bei dem Substituierbarkeitspotenziale verschiedener Berufe abgefragt werden können, sind entgegen der hohen Angaben zu möglichen zukünftigen Ersetzbarkeiten derzeit

²⁶In einer englischen Studie werden ebenfalls Bauberufe auf ihre Automatisierungswahrscheinlichkeit hin bis zum Jahre 2040 beispielhaft analysiert, z. B. *Dachdecker/-in*, *Bodenleger/-in* oder *Maler/-in* (vgl. Mace 2017, S. 16).

noch keine Tätigkeiten im Mauerwerksbau ersetzbar (vgl. Futuromat 2019, o. S.). Da weniger als 30 % der traditionellen Handlungen durch Roboter erledigt werden können, stellt sich die Automatisierbarkeit bei Mauer/-innen nach Informationen des *Instituts für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung* bisher also noch als niedrig dar (vgl. ebd.).

Für den Beruf *Stahlbetonbauer/-in* stellt sich ein ähnliches Bild wie bei Maurer/-innen dar. Aussagen für die Ersetzbarkeit müssen im Hinblick auf das Erstellen von Bauwerken jedoch aufgrund unterschiedlicher Berufsbezeichnungen in Amerika und in Deutschland genauer analysiert werden. So findet sich in der Studie von Frey & Osborne (2013) kein entsprechendes Pendant für den im deutschen Bildungssystem verankerten Beruf Stahlbetonbauer/-in. Lediglich die Berufe *cement masons* and *concrete finishers* sind dort zu finden. Letzterer kann mit einer Übersetzung als *Betonverarbeiter/-in* und mit zugehörigen 94 % Automatisierungswahrscheinlichkeit Tab. 3.3 entnommen werden. Eine weitere amerikanische Studie liefert für diesen Beruf mit 88 % ebenfalls eine hohe mögliche Ersetzbarkeit (vgl. Manzo et al. 2018, S. 8). Da kein direkter Vergleich einzelner Berufe oder sogar spezifischer Tätigkeiten möglich ist, sind exakte Gegenüberstellungen der jeweiligen Werte nicht möglich. So ist bspw. die Tatsache, dass die scheinbar repetitiveren Tätigkeiten des Mauerns mit 82 % unter den für Betonverarbeiter/-innen ermitteltem Wert von 94 % liegen, nur bedingt als Erkenntnis nutzbar. Schaut man sich darüber hinaus die Angaben des *Futuromats* für Stahlbetonbauer/-innen an, so ist feststellbar, dass derzeit lediglich eine einzige Handlung von Robotern übernommen werden kann: *Oberflächen behandeln und veredeln* (vgl. Futuromat 2019, o. S.). Auch wenn das Substituierbarkeitspotenzial für Stahlbetonbauer/-innen aktuell ebenfalls niedrig ist, muss – wie bereits zuvor dargestellt wurde – berücksichtigt werden, dass neue digitale Entwicklungen zukünftig auch für Arbeitstätigkeiten wie Schalen, Bewehren oder Betonieren immer häufiger zur Anwendung kommen können. So ist es bspw. denkbar, dass die Additive Fertigung – die zwar keine direkten Tätigkeiten von Stahlbetonbauerinnen und Stahlbetonbauern übernehmen wird – dennoch durch übergeordnete Substitutionen massive Änderungen, v. a. im Wohnungsbau hervorrufen kann (vgl. Schach et al. 2017, S. 360).

3.3 Soziotechnischer Wandel von Baustellen infolge Digitalisierung

3.3.1 Betrachtung von Baustellen als soziotechnische Systeme

Die Betrachtung einer Baustelle als temporär existierendes soziotechnisches System ist im Hinblick auf die immer häufigere Nutzung digitaler Technologien von zunehmender Bedeutung. Um den Wandel der bisher eher handwerklich geprägten Baubranche hin zu möglichen *Cyberphysischen Systemen* aufzuzeigen, wird im vorliegenden Abschnitt erläutert, was unter einem soziotechnischen System *Baustelle* im Rahmen des Forschungsvorhabens zu verstehen ist, und wie dieses sich durch die immer intensiver werdende Interaktionen zwischen Menschen und Maschinen verändern wird. Die mit dem digitalen Wandel verbundenen Fragen nach zukünftigen Funktions- und Aufgabenverteilungen innerhalb von Baustellenarbeitsprozessen werden anschließend in Abschnitt 3.3.2 mit dem Fokus auf Mensch-Maschine-Interaktionen aufgegriffen. Diesbezüglich sind drei Allokationsstufen aufgeführt, die anknüpfend an die bereits thematisierten Entwicklungsstufen in Abschnitt 3.2.2, als grundlegendes Konzept für die Verortung von Baustellenarbeitstätigkeiten angesehen werden können. Abschließend wird auf Erkenntnissen, die vornehmlich im Rahmen der Sektoranalyse gewonnen wurden, in Abschnitt 3.3.3 diskutiert, ob Bauwerke zukünftig mithilfe Cyberphysischer Systeme auch ohne menschliche Arbeitskräfte errichtet werden können.

Betrachtet man die Digitalisierung als ein System in dem innovative Medien und Geräte ohne Nutzung durch Menschen verortet sind, so ergeben sich in einem solchen rein technischen Gebilde noch keine direkten Anforderungen an Individuen oder Gruppen.²⁷ Erst bei Verwendung entsprechender elektronischer oder digitaler Gegenstände durch Menschen kann von Systemen soziotechnischer Art gesprochen werden (vgl. Lenk & Ropohl 1993, S. 6; Hägele 2002, S. 75; Drossel et al. 2018, S. 200; Schlick et al. 2018, S. 21). Über diese recht einfache Betrachtungsweise einer bipolaren Interaktion zwischen Mensch und Maschine hinaus, bestehen zusätzlich weitere Systemzusammenhänge, z. B. zwischen der natürlichen Umwelt oder der Gesellschaft insgesamt (vgl. VDI 3780 2000, S. 4). Dies trifft insbesondere auch auf Baustellen und die während diesen Phasen entstehenden Bauobjekte zu. Aber nicht nur im Rahmen von Bauwerkserstellungen, auch bei Nutzung der entsprechenden Objekte ist mit erheblichen Einflüssen, z. B. in ökologischer oder infrastruktureller Art, auf die Umgebung zur rechnen. Für das vorliegende Forschungsvorhaben wird das soziotechnische System *Baustelle* insbesondere durch die Wechselwirkungen zwischen neuen digitalen Arbeitsmitteln und den damit entstehenden Zusammenhängen innerhalb arbeitsprozessrelevanter Mensch-Maschine-Beziehungen – in denen Informationen transportiert, gewandelt oder gespeichert werden – verstanden (vgl. Hägele 2002, S. 75; Rammert 2016, S. 12). Eine entsprechende konzentrierte Betrachtungsweise ergibt sich insbesondere durch die bereits angesprochenen Änderungen infolge BIM.

²⁷Verschiedene Betrachtungsweisen des Begriffs *Digitalisierung* sind in Abschnitt 2.1: *Der Begriff der Digitalisierung im Bezug auf das Forschungsvorhaben* zu finden.

Mit zunehmender Digitalisierung und Automatisierung werden innerhalb soziotechnischer Systeme nicht nur die bisher von Menschen ausgeführten Tätigkeiten an Maschinen übertragen, auch die neu entstehenden Schnittstellen zwischen technischen und humanen Akteuren rufen signifikante Veränderungen, insbesondere kommunikativer Art hervor (vgl. Sonntag et al. 2012, S. 427; Hacker 2014, S. 73). Die durch die Effekte der Digitalisierung entstehenden Wirkungszusammenhänge sind in den immer stärker vernetzten Systemen auch in ihren Folgen für die berufliche Facharbeit zu berücksichtigen (vgl. Hägele 2002, S. 75; Hacker 2014, S. 74). Um Benutzerschnittstellen zwischen Menschen und Maschinen im Hinblick auf bauprozessrelevante Aspekte sinnvoll gestalten zu können, müssen diese im Rahmen von Arbeitsumgebungen insbesondere an die Bedürfnisse von Menschen angepasst werden (vgl. Mehler-Bicher & Steiger 2014, S. 60). Die Einbindung und Nutzung digitaler Werkzeuge definiert darüber hinaus nicht nur die eigentlichen Ausführungsbedingungen, sondern erfordert auch spezifische Qualifikation der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter (vgl. Sonntag et al. 2012, S. 428), damit diese innerhalb der immer komplexer werdenden soziotechnischen Systeme handlungsfähig sind und bleiben (vgl. Drossel et al. 2018, S. 200).

Neben den beiden vordergründigen Teilsystemen *Technologie* und *Mensch* müssen innerhalb soziotechnischer Gebilde insbesondere auch Aspekte der *Organisation* berücksichtigt werden (vgl. Hirsch-Kreinsen et al. 2018, S. 183).²⁸ Durch die Einbindung der Methode BIM ist zu erwarten, dass sich die Baustellenabläufe aufgrund neuer Interdependenzen zwischen Menschen und Maschinen massiv verändern. So sind zukünftig viele Organisationsprozesse auf Grundlage eines zentralen Bauwerksinformationsmodells zu steuern. Durch Nutzung miteinander vernetzter digitaler Arbeitsmittel steigt dabei auch der Informationsgehalt innerhalb von soziotechnischen Systemen (vgl. Hacker 2014, S. 478). Ein entsprechender Informationszuwachs betrifft, wie bereits dargestellt, zukünftig auch Arbeitsprozesse direkt auf Baustellen. Neben einer reinen Werkzeugverwendung und der Bedienung stationärer Maschinen ist es innerhalb soziotechnischer Systeme somit ebenfalls wichtig, dass die jeweiligen technischen Anlagen im Rahmen ihrer Nutzung projektspezifisch gesteuert und überwacht werden (vgl. Sonntag et al. 2012, S. 427). In Abschnitt 4.1: *Informatisierung und Wissensmanagement auf Baustellen* werden entsprechende Aspekte genauer untersucht.

²⁸ Alternativ können neben den Teilsystemen *Technologie*, *Mensch* und *Organisation* drei weitere Formen und Träger der Technisierung (*Habitualisierung*, *Mechanisierung* und *Algorithmisierung*) innerhalb soziotechnischer Konstellationen aufgefasst werden (vgl. Rammert 2016, S. 12).

3.3.2 Mensch-Maschine-Interaktionen auf Baustellen

Da für die zukünftigen Tätigkeiten auf Baustellen die Interaktionen von Baufacharbeiterinnen und Baufacharbeitern mit den in Abschnitt 2.4 dargestellten technologischen Neuerungen immer stärker in den Fokus rücken, werden im vorliegenden Abschnitt die mit einem entsprechenden Wandel einhergehenden Aspekte zwischen Mensch und Maschine analysiert.²⁹ Zuerst wird dargelegt, dass durch ubiquitäre Weiterentwicklungen von Robotern auch immer stärker zunehmende Kooperationsprozesse im Rahmen sozio-technischer Beziehungen zu berücksichtigen sind. Daran anschließend wird aufgezeigt, dass diese Entwicklungen im Hinblick auf die behandelten Themenbereiche zukünftig eine immer größere Relevanz aufweisen. Mithilfe von Allokationsstufen wird darüber hinaus eine Grundlage für mögliche Verortungen von Baustellentätigkeiten geschaffen. Neben der Darstellung der Zunahme von Mensch-Maschine-Interaktionen auf Baustellen und den damit einhergehenden digitalen Veränderungen, dient der vorliegende Abschnitt zudem als Beleg für die Wichtigkeit zur Auseinandersetzung mit der Thematik hinsichtlich Informatisierung und Kommunikation.

Entwicklung und aktueller Forschungsstand zur Mensch-Maschine-Interaktion

Betrachtet man jüngste Entwicklungen technischer Geräte und Computer, so kann festgestellt werden, dass sich eine damit einhergehende Verwendung nicht nur intensiviert, sondern auch immer interaktiver gestaltet. Während in den 1990er Jahren PCs größtenteils auf oder unter Schreibtischen platziert wurden, befinden sich mobile Endgeräte heute noch in den Hosen- oder Handtaschen der jeweiligen Nutzer/-innen und künftig sogar vermehrt direkt am Körper – sei es in Form von Uhren, Brillen, Schuhen oder Prothesen (vgl. Jordan 2017, S. 293).³⁰ Auch wenn sich die Erforschung der damit einhergehenden Auswirkungen auf den Menschen noch in einem frühen Stadium befindet, und eine einheitliche Entwicklung darüber hinaus auch nur schwer zu fassen ist, werden sich die immer stärker verflochtenen Kommunikationsformen von Mensch-Maschine-Schnittstellen dennoch zunehmend verintensivieren (vgl. Mehler-Bicher & Steiger 2014, S. 60; Frenz et al. 2015, S. 13; Möller 2015, S. 7; Rammert 2016, S. 34; Jordan 2017, S. S. 245 und S. 326; Ramge 2018, S. 74; Salmi et al. 2018, S. 25-26). Eine Auseinandersetzung mit der Frage, welche Funktionen zukünftig von Menschen und welche von technischer Seite übernommen werden können – bzw. welche Aufgabenverteilungen infolge Substitutionen dadurch entstehen – ist im Rahmen von Arbeitsprozessanalysen unverzichtbar (vgl. Sonntag et al. 2012, S. 428; Hacker 2014, S. 74 und S. 566; Jordan 2017, S. 237 und S. 257; Drossel et al. 2018, S. 200; Hirsch-Kreinsen et al. 2018, S. 184; Scheer & Wachter 2018, S. 85).

²⁹Für die Bezeichnung der Interaktion zwischen Mensch und Maschine existieren in der Fachliteratur viele verschiedene Bezeichnungen. Innerhalb des Forschungsvorhabens wird die Beziehung zwischen beiden Polen als *Mensch-Maschine-Interaktion* weiter betrachtet.

³⁰Entsprechende digitale Neuentwicklungen wurden in Abschnitt 2.4.1: *Mobile Endgeräte und Wearable Computing* dargestellt.

Ein Mensch-Maschine-System besteht i. d. R. aus einem übergeordneten Nutzungskontext, den jeweiligen Benutzer/-innen, der eigentlichen Aufgabe und den Werkzeugen, die für die Umsetzung dieser Aufgabe verwendet werden. Im Rahmen der Digitalisierung verschmelzen die untereinander in Beziehung stehenden Elemente und erhöhen gleichzeitig die immer komplexer werdenden Interaktivitäten zwischen Menschen und den jeweiligen technischen Objekten (vgl. Rammert 2016, S. 34; Faber & Mertens 2018, S. 6). Damit nun Menschen und Maschinen in einem System miteinander funktionieren können, ist die Gestaltung der jeweiligen Schnittstellen von zentraler Bedeutung (vgl. Oesterreich & Teuteberg 2016, S. 1435).

Bereits heute können innerhalb diverser Arbeitsfelder verschiedene Tätigkeiten mit innovativen Technologien kombiniert werden (vgl. Petruck 2016, S. 10; Dengler & Matthes 2018, S. 2; Ramge 2018, S. 75). Entsprechende Integrationen digitaler Arbeitsmittel in existierende Systeme müssen dabei nicht zwangsläufig aus Robotern bestehen, sondern können bspw. auch multimodal durch Augmented Reality oder Sensortechniken erfolgen (vgl. Drossel et al. 2018, S. 200; Hirsch-Kreinsen et al. 2018, S. 183). Dabei fungieren die Maschinen und Werkzeuge entweder vordergründig als intelligente Assistenzsysteme, dienen der Informationsbereitstellung (vgl. Hirsch-Kreinsen et al. 2018, S. 183) oder sie übernehmen immer öfter auch unplanbare Tätigkeiten, so dass Arbeitsabläufe auf menschlicher Seite zukünftig vermehrt aus Reparaturen, Beratungen oder Betreuungen bestehen werden (vgl. Brater 2010, S. 824).

Allokationsstufen für Mensch-Machine-Interaktionen

Da es einen signifikanten Unterschied macht, ob technische Objekte mit Händen bedient, mit Sprachbefehlen bzw. Gesten gesteuert oder am Körper getragen werden, ist eine Trennung in Interaktionsstufen, in denen die jeweilige Beziehung definiert wird, überaus sinnvoll (vgl. Rammert 2016, S. 36). Über eine Einteilung in Allokationsstufen ist es aufgrund der vielen neuen digitalen Innovationen daher auch aus wissenschaftlicher Sicht wichtig, die mannigfaltigen und umfangreichen neue Anforderungen infolge Mensch-Maschine-Interaktionen herauszuarbeiten und mithilfe der daraus gewonnenen Erkenntnisse festzulegen, welche Regeln, welches Grundverständnis, welche Kompetenzen und welche Verarbeitung von Informationen für die Facharbeiterinnen und Facharbeiter in Zukunft relevant werden (vgl. Jokovic & Stockinger 2016, S. 49; Butz & Krüger 2017, S. 2; Jordan 2017, S. 32 und S. 243; Schlick et al. 2018, S. 186). Neben Mechanismen der Wahrnehmung und Kognition innerhalb von Mensch-Maschine-Systemen (vgl. Butz & Krüger 2017, S. 9), spielen darüber hinaus insbesondere auch lern- und gesundheitsfördernde Aspekte, sowie Arbeits- und Bedienungsgestaltungen wesentliche Rollen im Hinblick auf das Erfassen relevanter Qualifikationen (vgl. Rauner 2008, S. 125; Hacker 2014, S. 75). Entsprechende Anforderungen gehen wiederum sehr stark mit den bereits angesprochenen Kommunikationsvorgängen zwischen Menschen und Maschinen einher (vgl. Sonntag et al. 2012, S. 429; Mehler-Bicher & Steiger 2014, S. 59), die im Rahmen des Forschungsvorhabens in Abschnitt 4.2: *Kommunikationsvorgänge auf Baustellen* genauer analysiert werden.

Auch wenn nicht verallgemeinert werden kann, wann welche Verfahren innerhalb von Arbeitsprozessen wie zur Anwendung kommen (vgl. Dreher 2016, S. 74), sind nachfolgend drei Allokationsstufen aufgeführt, mit denen Tätigkeiten auf Baustellen annäherungsweise verortet werden können.³¹ Aufgrund des bereits dargestellten starken Einflusses technologischer Neuentwicklungen auf das Bauwesen, wird somit ein Rahmen bereitgestellt, in dem einzelne Arbeitsschritte, aber auch ganze Prozesse zugehörig sind. Insbesondere durch die Verortung der Tätigkeiten von Baufacharbeiterinnen und Baufacharbeitern in die nachfolgend aufgeführte Allokationsstufe 2 wird ein Zuordnungsbereich für die Analyse der Mensch-Maschine-Interaktionen geschaffen. Dass eine entsprechende nachvollziehbare Zuweisung erforderlich ist, ergibt sich nicht nur aus der Tatsache, dass digitale Werkzeuge in Zukunft per se vermehrt eingesetzt werden, sondern auch dadurch, dass Informationsbezüge während der Bauausführung immer häufiger auf digitalen Bauwerksinformationsmodelle beruhen (vgl. Brehm 2019, S. 93).

Bei der Betrachtung von Mensch-Maschine-Interaktionen auf Baustellen entstehen nicht nur Herausforderungen durch die bereits angesprochenen unabwägbaren Situationen in Planung und Ausführung, z. B. wenn massiver Zeitdruck vorherrscht oder kurzfristige Änderungen von Zeichnungen zu berücksichtigen sind, sondern auch im Hinblick auf die Sicherheit von Baufacharbeiterinnen und Baufacharbeitern vor Ort (vgl. Brehm 2019, S. 92). Eine gefähderungsfreie Zuverlässigkeit von Maschinen muss dabei v. a. in Extremsituationen gewährleistet sein (vgl. Hacker 2014, S. 426).

Da jedoch selbst modernste Technologien menschliche Fehlhandlungsquellen nicht vollständig berücksichtigen können, ist es von großer Bedeutung, das mögliche Unfallrisiken beim Einsatz von Robotern zumindest minimiert werden (vgl. Hacker 2014, S. 426; Brehm 2019, S. 92). Denn auch wenn kollaborierende Roboter bereits mit intelligenten Sensoren ausgestattet sind, müssen Situationen, in denen sich Fachkräfte verletzen können, stets verhindert werden (vgl. Dengler & Matthes 2018, S. 2). Vordergründig bieten sich dafür Systeme an, die mithilfe von Lasern und Sensoren erkennen, wann Menschen in Gefahr sind (vgl. Jordan 2017, S. 227; Winkelhake 2017, S. 74; Menges et al. 2019, S. 10).

Nachfolgend sind die drei Allokationsstufen aufgeführt, in denen die innovativen Arbeitsmittel unterschiedlich stark in Baustellenarbeitsprozesse eingebunden sind.³² Stufe 1 beschreibt diesbezüglich die bisher auf Baustellen stattfindenden traditionellen Abläufe und Vorgehensweisen. In Stufe 2 findet eine verstärkte Einbindung digitaler Arbeits- und Hilfsmittel statt, während sich in Stufe 3 die Eingriffe und Handlungen von Menschen nur noch als sehr gering darstellen. Alle drei Allokationsstufen decken sich mit drei Kategorien von Baustellen-Robotern nach Saidi et al. (2016, S. 1498). Zu berücksichtigen ist

³¹Auch wenn eine optimale Abstimmung für verschiedene Arbeitsprozesse wünschenswert ist (vgl. Sonntag et al. 2012, S. 428; Hacker 2014, S. 74 und S. 115; Hirsch-Kreinsen et al. 2018, S. 183), können definierte Mensch-Maschine-Funktionsteilung stets nur bedingt ermittelt werden.

³²Eine Allokation bezeichnet eine Funktionsteilung zwischen Mensch und Technik (vgl. Hacker 2014, S. 566). In Sonntag et al. (2012, S. 430-432) sind drei Stufen entsprechender Mensch-Maschine-Systeme mithilfe von Abbildungen dargestellt.

in jedem Fall, dass zwischen den einzelnen Stufen die Übergänge in der Praxis stets fließend sind (vgl. Sonntag et al. 2012, S. 433; Menges et al. 2019, S. 10).

1. Allokationsstufe: Traditionelle Baustellenarbeitsprozesse

Die erste Stufe beinhaltet Vorgänge, bei denen keine digitalen Arbeitsmittel eingesetzt werden. Innerhalb dieser Prozesse finden allenfalls handgeführte, energiebetriebene technische Geräte Verwendung, wie bspw. Handkreissägen zum Zurechtschneiden von Holzschalungen oder Innenrüttler für die Betonverdichtung (vgl. Sonntag et al. 2012, S. 427). Alle traditionell eingesetzten Geräte auf Baustellen weisen i. d. R. keinerlei Vernetzung untereinander auf. Da Baufachkräfte in dieser ersten Stufe unabhängig von digitalen Grundlagen Entscheidungen treffen, handelt es sich um ein sogenanntes *Wissensbasiertes System* (vgl. Sonntag et al. 2012, S. 61). Die eigentliche Planung, wann welche Tätigkeiten ausgeführt werden, obliegt somit den Baufacharbeiterinnen und Baufacharbeitern vor Ort (vgl. Saidi et al. 2016, S. 1498). Das Interpretieren relevanter Angaben für die Ausführung von Bautätigkeiten erfolgt dabei bspw. auf Grundlage von zweidimensionalen Zeichnungen. Durch die ständige Anwesenheit von Menschen auf Baustellen und durch das gleichzeitige Nicht-Vorhandensein von Robotern kann die erste Allokationsstufe als sog. *WerkzeugszENARIO* aufgefasst werden (vgl. Hirsch-Kreinsen et al. 2018, S. 184). Es handelt sich dabei generell um Mensch-zentrierte Systeme, in denen Akteurinnen und Akteure autark und ohne digitale Bauwerksinformationsmodelle Entscheidungen treffen bzw. Aufgaben in Abhängigkeit der vorzufindenden Situationen vornehmen können (vgl. Hacker 2014, S. 111).

2. Allokationsstufe: Vernetzte Maschinen und Werkzeuge

Die zweite Allokationsstufe beschreibt einen sog. „Shared-Workspace“ (Engels et al. 2018, S. 227). Es handelt sich dabei um Arbeitsplatzumgebungen, in denen menschliche Akteur/-innen und Maschinen gemeinsam miteinander interagieren. Bereits bei dieser Stufe kann von einem *Technologie-zentrierten System* gesprochen werden, da grundlegende Vorgaben von Computern gemacht und stellenweise auch gesteuert werden (vgl. Hacker 2014, S. 111). Für Baustellen bieten sich diesbezüglich zentrale und mit allen relevanten Daten versehene BIM-Modelle an. Für das Abrufen notwendiger Informationen vor Ort können bspw. mit Sensoren ausgestattete, digitale Arbeits- und Hilfsmittel, wie z. B. AR-Anwendungen – die auf relevante Objektdaten des Modells zurückgreifen – herangezogen werden (vgl. Mehler-Bicher & Steiger 2014, S. 3; Saidi et al. 2016, S. 1498). Auch wenn im Rahmen der Allokationsstufe 2 viele Entscheidungen immer noch vor Ort getroffen werden, reagieren Facharbeiterinnen und Facharbeiter größtenteils auf Vorgaben des Systems (vgl. Scheer & Wacher 2018, S. 86). Da exakte Zuordnungen von Menschen und Maschinen auf Baustellen aufgrund der vielen mannigfaltigen Tätigkeiten nur bedingt möglich sind, handelt es sich bei Allokationen innerhalb der Stufe 2 stets um gleitende Automatisierungsgrade, die abwechslungsreiche Mischungen aus manueller und vollautomatisierter Produktion enthalten können (vgl. Menges et al. 2019, S. 10). Ein mögliches Szenario beinhaltet bspw. Vorgänge, bei denen Facharbeiterinnen und Facharbeiter zentrale Informationen eines digitalen Systems nutzen. Erweiterungen sind diesbezüglich ebenfalls denkbar, z. B. wenn die verwendeten Technologien Prozesse über-

wachen und durch Abgleiche die noch ausstehenden Arbeitsabläufe bereits angepasst vorgeben (vgl. Rauner 2008, S. 125). Ein weiteres Szenario stellt sich dar, wenn viele der Herstellungsprozesse von Maschinen ausgeführt werden. So ist es durchaus möglich, dass Roboter auch auf Baustellen zukünftig durch Anweisungen – ggf. aus der Ferne – von Menschen gesteuert werden können (vgl. Saidi et al. 2016, S. 1498). Dies kann u. a. durch verschiedene Eingabemedien, z. B. durch Tastaturen, Tablets, Mikrofone oder Datenhandschuhe, sowie durch Signale und Gesten, z. B. Sensoren oder Handbewegungen, geschehen (vgl. Sonntag et al. 2012, S. 430 und S. 440; Ramge 2018, S. 76). Je intensiver Maschinen eingesetzt werden, desto weniger manuelle Tätigkeiten fallen auf Seiten der Fachkräfte an. Ihre Aufgabenfelder sind diesbezüglich in überwiegend roboterlastigen Systemen vermehrt durch Beobachtungen bzw. Überwachungen der jeweiligen automatischen Prozesse vordefiniert (vgl. Sonntag et al. 2012, S. 430; Hacker 2014, S. 111; Wischmann & Hartmann 2018, S. 3). Entsprechende Szenarien des hier beschriebenen *regelbasierten Verhaltens* bilden die Basis für die nachfolgend dargestellte Allokationsstufe 3, in der Roboter fast vollständig ohne menschliches Eingreifen agieren (vgl. Sonntag et al. 2012, S. 61; Hirsch-Kreinsen et al. 2018, S. 184).

3. Allokationsstufe: Intelligente Systeme (CPS)

Bei der dritten Stufe handelt es sich um Arbeitssysteme, in denen menschliche Fachkräfte nur noch bedingt Einfluss auf die in diesen Umgebungen stark miteinander vernetzten Prozesse nehmen können. Intelligente vollautonome Baustellenroboter sind in entsprechenden Gesamtsystemen bspw. in der Lage programmierte Aufgaben eigenständig auf Grundlage eines BIM-Modells zu erledigen (vgl. Saidi et al. 2016, S. 1498). Diese Stufe, bei der Maschinen über einen oder mehrere Rechner gesteuert werden (vgl. Sonntag et al. 2012, S. 431), beschreibt bereits *intelligente Systeme*, in denen sehr viel halb- bzw. vollautomatisch abläuft (vgl. Saidi et al. 2016, S. 1498). Es handelt sich vordergründig um automatisierte Operationen, die bspw. über Signale gesteuert werden (vgl. Sonntag et al. 2012, S. 61). Roboter können innerhalb der Allokationsstufe 3 aber nicht nur ihre Umgebung wahrnehmen (vgl. Saidi et al. 2016, S. 1498), sondern darüber hinaus auch Planungen im Hinblick auf optimal berechnete Abläufe und Aufgaben eigenständig durchführen und anschließend mit möglichen Zuweisungen an menschliche Akteurinnen und Akteure weitergeben (Engels et al. 2018, S. 227). So ist es einerseits denkbar, dass Fachkräfte auf die Vorgaben des übergeordneten Systems reagieren, oder aber, dass neue bzw. abgeänderte Befehle durch menschliche Entscheidungen an die Maschinen und Roboter übertragen werden (vgl. Böhle 2010, S. 160; Sonntag et al. 2012, S. 432; BMBF 2013, S. 29; Engels et al. 2018, S. 227). Die hier angerissenen Aspekte vorwiegend computergesteuerter Abläufe werden anhand *Cyberphysischer Systeme* im folgenden Abschnitt im Hinblick auf Baustellen genauer analysiert.

3.3.3 Baustellen als Cyberphysische Systeme

Anknüpfend an die im vorherigen Abschnitt dargestellten Aspekte der immer stärker zu berücksichtigenden Mensch-Maschine-Interaktionen werden nachfolgend – auf den zuvor gewonnenen Erkenntnissen aufbauend – automatische Verfahrensweisen diskutiert, die ohne menschliche Akteurinnen und Akteure auskommen. Dafür sind die bereits erwähnten *Cyberphysischen Systeme (CPS)* insbesondere im Hinblick auf potenzielle Umsetzbarkeiten im Bauwesen nicht nur skizzenhaft dargestellt, sondern anhand vor-dergründiger Probleme und Schwierigkeiten ebenfalls kritisch erörtert. Um aufzuzeigen, wie die *Baustelle der Zukunft* durch den Einsatz *Künstlicher Intelligenz* aussehen kann, ist anschließend an die Darstellung von Systemen, die zwar digital ausgerichtet, aber noch von Menschen überwacht werden, ein Ausblick auf autonome Systeme gegeben, die durch Einbindungen heterogener Roboter und mithilfe von vernetzter Software bzw. umfangreicher Datenbanken, auch ohne menschliche Aktionen auskommen. Zuvor ist jedoch – anknüpfend an die vorangestellten soziotechnischen Betrachtungsweisen – eine Definition Cyberphysischer Systeme und einer damit einhergehenden Kategorisierung möglicher CPS-Subsysteme gegeben. Ziel des vorliegenden Abschnitts ist es aufzuzeigen, dass Cyberphysische Systeme in Zukunft auch für Baustellen eine immer größere Rolle spielen werden.

Definition und Anwendungsfelder von Cyberphysischen Systemen

Das Wort *Cyberphysik* leitet sich vom Begriff der Kybernetik ab. Übergeordnet handelt es sich um technische Steuerungsvorgänge, bei denen automatische Aktionen ohne menschliches Zutun ausgeführt werden (vgl. Blockley 2005, S. 116; Müller 2012, S. 177). Entsprechende *Cyberphysische Systeme* finden sich bisher v. a. in industriellen und stationären Bereichen, z. B. bei Vorgängen der Produktion und Lagerlogistik (vgl. Drossel et al. 2018, S. 199; Ramge 2018, S. 16; Wischmann & Hartmann 2018, S. 2). Aber auch in anderen Branchen, z. B. in der Landwirtschaft oder dem Dienstleistungsbereich, ist ein großer Trend zur Nutzung intelligenter, miteinander vernetzter Systeme zu erkennen (vgl. Drossel et al. 2018, S. 199; Mechtcherine & Nerella 2018a, S. 275; Wischmann & Hartmann 2018, S. 3). Generell handelt es sich bei den dezentralen und maschinengelenkten Steuerungen bzw. Produktionen um Verschmelzungen zwischen Menschen, Maschinen, Produkten und Objekten, die häufig über das Internet kooperativ vernetzt sind und in Echtzeit miteinander kommunizieren (vgl. BMBF 2013, S. 6; Ganschar et al. 2013, S. 23; Benner 2015, S. 91; BMAS 2015, S. 15; Wolter et al. 2015, S. 12 und S. 14; Arntz et al. 2016, S. 2; BM 2016, S. 109; Jokovic & Stockinger 2016, S. 49; Krüger 2017, S. 6 und S. 8; Winkelhake 2017, S. 343; Bauer 2018, S. 4; Drossel et al. 2018, S. 198; Wolf et al. 2018, S. 124).

Insbesondere bei der Herstellung von Produkten werden Cyberphysische Systeme auch als *Smart Factories* bezeichnet (vgl. Samulat 2017, S. 3; Drossel et al. 2018, S. 199; Engels et al. 2018, S. 222). Durch kontinuierliche Informationsweiterleitungen zwischen Maschinen und Produkten sind Abläufe in entsprechenden Konstrukten ohne zusätz-

liche menschliche Interaktionen möglich, da die Systeme automatisch vorgeben, was verarbeitet werden soll, wofür etwas gebraucht wird oder wohin etwas transportiert werden soll (vgl. BMBF 2013, S. 6; Wolter et al. 2015, S. 14; Krüger 2017, S. 6). Innerhalb Cyberphysischer Systeme werden die vorhandenen mechanischen bzw. elektronischen Elemente über sog. eingebettete Systeme (*embedded systems*) realisiert, die mittels Sensoren ihre lokale Umwelt wahrnehmen und durch ihr Agieren und Eingreifen ebenfalls die physische Umwelt beeinflussen können (vgl. Graßler & Beaujean 2016, S. 60; Winkelhake 2017, S. 343; Drossel et al. 2018, S. 198).

Cyberphysische Systeme sind nicht per se ohne menschliche Eingriffe definiert. So lassen sich – angelehnt an die in Abschnitt 3.3.2 aufgeführten drei Allokationsstufen – nach Drossel et al. (2018) insgesamt vier Kategorien definieren. Beispielsweise handelt es sich bei *Autonomen Systemen* um Konstrukte, bei denen komplexe Aufgaben ganz ohne menschliche Hilfe selbständig gelöst werden (vgl. ebd., S. 199). In der zweiten Kategorie, den *Dynamisch vernetzten Systemen* finden Zusammenspiele vieler Einzelkomponenten statt, die autark voneinander agieren und unabhängig bzw. von verschiedenen Anbietern entwickelt werden können. Bei den *interaktiven soziotechnischen Systemen* werden die Bedürfnisse flexibel an die Anwenderinnen und Anwender angepasst, um sie kontextbezogen zu unterstützen. Interaktionen finden dabei multimodal, z. B. durch Sprache oder Gestik, und auf Basis unterschiedlichster Technologien, z. B. mithilfe von AR oder RFID, statt. Das Resultat ist wiederum ein soziotechnisches Gesamtsystem, wie es bereits zuvor beschrieben wurde. Das vierte System, das *Produkt-Service-System*, verzahnt insbesondere Sach- und Dienstleistungen. In der Regel handelt es sich dabei um die Erfassung, Verarbeitung und Auswertung von Daten (vgl. ebd., S. 200). Entsprechende Systeme finden sich bereits heute in vielen Lebens- und Arbeitswelten wieder, z. B. wenn Pakete nachverfolgt werden können oder Bezahlungen mithilfe mobiler Software-Applikationen möglich sind.

Da in den vorangegangenen Abschnitten bereits viele Vorteile der Digitalisierung explizit dargelegt wurden, seien an dieser Stelle ergänzend dazu nur einige Vorteile Cyberphysischer Systeme erwähnt.³³ Vordergründig sind neben optimierten Produktivitäts- und Effizienzsteigerungen insbesondere verbesserte Lagerhaltungen sowie mögliche Reduzierungen von Fehlern während der Bauausführung zu nennen (vgl. Wolter et al. 2015, S. 15; BM 2016, S. 109; Dreher 2016, S. 72; Ramge 2018, S. 72). Aus arbeitsprozess-relevanter Sicht stellen die möglichen dynamischen Kooperation verschiedener Komponenten in Cyberphysischen Systemen große Potenziale bereit, z. B. durch ein gemeinsames Heben und Transportieren schwerer Lasten oder durch mögliche Arbeits- und Aufgabenteilungen zwischen Menschen und Maschinen (vgl. Helm 2014, S. 175-176).

³³Zu Vorteilen der Digitalisierung im Bauwesen kann an dieser Stelle auf die Abschnitte 2.3.1: *Definition und Zielsetzung von Building Information Modeling* und 3.1.2: *Vor- und Nachteile der Digitalisierung für die Bauausführung* verwiesen werden.

Cyberphysische Systeme auf Baustellen – Potenziale und Schwierigkeiten

Die Idee einer computergestützten Fertigung im Bauwesen entstand bereits in den 1970er Jahren (vgl. Poppy et al. 1995, S. 100). In Verbindung mit dem industriellen Bauen und der umfassenden Vorfertigung in Großtafelbauweise wurden Überlegungen angestellt, wie Entwurfsprozesse und Bauvorbereitungen für die Erstellung von Bauwerken effizienter ablaufen könnten. Zu diesem Zweck sind Computerprogramme entwickelt worden, die bereits zu dieser Zeit auf Grundlage dreidimensionaler Modelle den Aufbau von Gebäuden aus genormten Fertigteilen ermitteln konnten. Die Programme waren jedoch nur in der Lage mit eben diesen Standardelementen zu arbeiten, komplexere Geometrien waren nicht möglich. Mit dem schwindenden Interesse am Fertigteilbau Anfang der 1980er Jahre boten auch die Anwendungen entsprechender Programme keine aussichtsreichen Perspektiven; sie wurden somit nicht weiterentwickelt (vgl. ebd.).

Die ersten Prototypen für die automatische Errichtung von Gebäuden wurden in den 1990er Jahren in Japan durchgeführt (vgl. Poppy et al. 1995, S. 96). Mithilfe einer vertikal wandernden Gerüstkonstruktion konnte bspw. sukzessiv der Bau eines Hochhauses ermöglicht werden. Seitdem sind in Japan 20 weitere Hochhäuser mithilfe automatischer Verfahren verschiedener Unternehmen errichtet worden (vgl. Saidi et al. 2016, S. 1511). Entsprechende Cyberphysische Systeme basieren dabei i. d. R. auf Stahlskelettkonstruktionen (vgl. Poppy et al. 1995, S. 96; Bock & Linner 2015, S. 217).

Auch wenn Cyberphysische Systeme bisher wenig Beachtung in Publikationen aus dem Bereich des Bauwesens finden (vgl. Oesterreich & Teuteberg 2016, S. 1435), weiten sich entsprechende automatische Konzepte – insbesondere auch durch den in Abschnitt 2.4.6 dargestellten Trend neuer Robotertechnologien oder durch stetig verbesserte Sensortechniken – immer weiter aus (vgl. Saidi et al. 2016, S. 1516; Ramge 2018, S. 71). Neben Aussagen, dass komplette Systeme von Baustellen in Zukunft auch ohne Facharbeiterinnen und Facharbeiter auskommen könnten (vgl. BIMplus 2017*b*, o. S.; Mechtcherine & Nerella 2018*a*, S. 275), findet sich mit dem Begriff „Connected Construction Site“ (Berger 2017, S. 7 und S. 13) in der Literatur auch bereits eine erste Bezeichnung für entsprechende Konzepte.

Über fixe Stahlgerüste, mobile Roboterentwicklungen bzw. umgebungswahrnehmende Sensortechnologien hinaus, werden im Hinblick auf die Nutzung Cyberphysischer Systeme für Baustellen auch additive Fertigungsverfahren immer interessanter. So bietet der bereits in Abschnitt 2.4.5 thematisierte 3D-Druck mögliche Konzepte für automatische Herstellprozesse an. Beispielsweise sind auf Grundlage von BIM-Modellen erforderliche Geometrie- und Stoffdaten direkt vor Ort extrahierbar. Die für die Herstellung von Bauwerken notwendigen Informationen können anschließend direkt an eine modifizierte Autobetonpumpe – wie sie bereits thematisiert wurde – übergeben werden. Infolge eines zuvor erstellten Betonierplans sind folglich sofortige Umsetzungen der Vorgänge in automatisierte Maschinenbewegungen möglich (vgl. Schach et al. 2017, S. 358 und S. 360).

Auch im Hinblick auf die ebenfalls bereits angesprochenen logistischen Abläufe sind Cyberphysische Systeme überaus relevant. So können bspw. autonome Transporte auf Baustellen in einem frühen Stadium benannt und anschließend während der Errichtung der jeweiligen Bauwerke durchgeführt werden (vgl. Hafner & Berlack 2018, S. 53). Dies kann bestenfalls bereits in der Arbeitsvorbereitung anhand eines entsprechenden BIM-Fachmodells geschehen. Mithilfe von Robotern oder selbstfahrenden Maschinen sind im Rahmen der Ausführung und auf Grundlage der im Modell enthaltenen Daten und Informationen Materialbewegungen in Abhängigkeit der örtlichen Gegebenheiten automatisch durchführbar (vgl. ebd.). Unter Zuhilfenahme der bereits in Abschnitt 2.4.4 thematisierten Auto-ID-Techniken sind Produkterkennungen und -nachverfolgungen zudem stets kontrollier- und steuerbar (vgl. ebd.). Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass insbesondere für große und komplexe Cyberphysische Systeme Vorkehrungen zu treffen sind, die frühzeitig alle relevanten baulogistischen Aspekte in einem entsprechenden Konzept vorsehen. Bestenfalls werden Bauvorhaben für diese Abläufe in verschiedene Zonen eingeteilt (vgl. Karl et al. 2017, S. 14).

Auch wenn im Vorfeld von Bauausführungen klare Strukturierungen – die am besten im Rahmen einer frühzeitigen und umfangreichen Arbeitsvorbereitung festgelegt werden – erforderlich sind, weisen zukünftige Anwendungen Cyberphysischer Systemen auf Baustellen bereits deutliche Nutzungspotenziale auf. Jedoch ist zu berücksichtigen, dass im Hinblick auf mögliche Umsetzungen entsprechender Konzepte derzeit noch viele Herausforderungen und Schwierigkeiten vorhanden sind. So ist neben den Problemen, dass häufig große Konstruktionen im Widerspruch zu den i. d. R. beengten Platzverhältnissen auf Baustellen stehen, ebenfalls zu beachten, dass flexible Anpassung im Baubetrieb vor Ort aufgrund starrer Vorrichtungen ggf. nur eingeschränkt möglich sind (vgl. Bock & Linner 2015, S. 205). Zudem stellen sich Hürden ein, wenn es darum geht, dass alle Komponenten, z. B. Bauteile, Materialien, Werkzeuge und ggf. auch Personen, vom Gesamtsystem, z. B. mithilfe von RFID oder Lasern, in einem logistischen übergeordneten Konzept berücksichtigt werden (vgl. Saidi et al. 2016, S. 1514; Mechtcherine & Nerella 2018a, S. 275).

Baustellen als *intelligente* Cyberphysische Systeme

Die bisher dargestellten Möglichkeiten zur Nutzung digitaler Werkzeuge – bis hin zu autonomen Systemen – sind auf Grundlage spezifischer bzw. bauwerksbezogener Daten, z. B. einem BIM-Modell, weitestgehend programmierbar. Durch Informationen, die im Rahmen einer Bauplanung – und insbesondere im Zuge einer auf digitale Prozesse ausgerichteten Arbeitsvorbereitung – bereitgestellt werden können, sind jedoch nicht nur einzelne Schritte von Robotern und Maschinen durchführbar, auch können miteinander kombinierte bzw. aufeinander abgestimmte Prozessabläufe umgesetzt werden. Aufgrund der komplexen Vorgänge auf Baustellen (s. Abschnitt 3.4) ist dies jedoch stets mit einem großen Aufwand verbunden, da für jedes Bauvorhaben die projektspezifischen Ausführungsprozesse explizit programmiert werden müssen.

Um die in Abschnitt 3.1.2 dargestellten Potenziale der Digitalisierung im Bauwesen trotzdem vollumfänglich nutzen zu können, sollte für *Baustellen der Zukunft* dennoch auf autonome bzw. kombinierte Möglichkeiten zur Errichtung von Bauwerken zurückgegriffen werden. Wenn Maschinen und Roboter ohne menschliche Interaktionen zusammenarbeiten, bieten sich durch rein digital ablaufende Bauprozesse nicht nur die bereits in Abschnitt 3.1.2 aufgeführten ökonomischen Mehrwerte an, auch sind computergesteuerte Systeme in der Lage, Fehler zu reduzieren, die normalerweise durch menschliche Eingriffe hervorgerufen werden. Mithilfe *Künstlicher Intelligenz (KI)*³⁴ können entsprechende autonome Prozesse ohne Interaktionen mit Facharbeiterinnen und Facharbeitern gesteuert werden, so dass durch computergestützte Vorgänge die zuvor beschriebenen Cyberphysischen Systeme autonom – und bestenfalls auf Grundlage von BIM-Modellen – ausführbar sind.³⁵

Um intelligente Produktions- bzw. Herstellungsprozesse zu ermöglichen ist nicht nur eine Abstimmung der Technologien untereinander notwendig, auch muss ein Zugriff auf umfangreiche Datenbanken vorhanden sein. Man spricht bei diesen auf Künstlicher Intelligenz basierenden Abläufen auch von *Big Data*, *Data Mining* oder *Process Mining* (vgl. Specht 2018, S. 180; Pan & Zhang 2021, S. 11). Die Potenziale der KI liegen durch Rückgriffe auf entsprechende Datenbanken v. a. in der Mustererkennung, z. B. durch *Computer Vision*, in der Unterstützung von Vorhersagen, z. B. durch Expertensysteme oder in der Optimierung von Prozessen, z. B. durch Verwendung einer *Blockchain* (vgl. Pan & Zhang 2021, S. 6 und S. 15).³⁶ Auch Drohnen können bei KI-Prozessen unterstützend helfen, z. B. bei Landvermessungen, bei Baustellenüberwachungen oder bei Bauzustandskontrollen (vgl. Wedel & Marx 2020, 836-845; Pan & Zhang 2021, S. 12). Mithilfe der angesprochenen *Computer Vision* sind diverse Objekte auf Baustellen bspw. nicht nur vom System erkenn- bzw. verifizierbar, auch können verschiedene Elemente anhand umfangreicher Datenbanken bestenfalls direkt zugeordnet werden (vgl. Xuehui et al. 2021, Zhou et al. 2021). Durch frühzeitiges Aufzeigen von Problemen bzw. durch rechtzeitige Meldungen bei Schwierigkeiten können intelligente Systeme darüber hinaus nicht nur aus wirtschaftlicher Sicht helfen Prozesse zu optimieren, auch sind sie in der Lage vor Gefahren zu warnen, falls sich Menschen auf Baustellen befinden (vgl. Pan & Zhang 2021, S. 2 und S. 6).

Die KI findet jedoch nicht nur bei der Erstellung von Bauwerken, sondern ebenfalls verstärkt in vorgelagerten Planungsprozessen Anwendung. So können bspw. künstliche Systeme bei der Bemessung von Tragwerken auf sog. *Generative Entwurfsprozesse* zurück-

³⁴Eine Definition zur Künstlichen Intelligenz wird an dieser Stelle nicht vorgenommen. Verschiedene Auffassungen zu diesem Themengebiet können u. a. in folgende Quellen nachgelesen werden: Ertel (2016, S. 2), Boden (2018, S. 16); Specht (2018, S. 221), Lenzen (2020, S. 10). Auch themenrelevante Aspekte, wie bspw. *Deep Learning*, *Machine Learning*, *Supervised Learning*, *Unsupervised Learning* oder *Reinforcement Learning* werden hier nicht explizit betrachtet.

³⁵Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass autonome Systeme nicht automatisch intelligente Systeme darstellen müssen (vgl. Winfield 2012, S. 13).

³⁶Das Phänomen der *Blockchain* wird hier nicht weiter erläutert. Es sei an dieser Stelle auf Specht (2018, S. 211) und Pan & Zhang (2021, S. 14) verwiesen.

greifen, bei denen mithilfe der zuvor erwähnten Datenbanken nicht nur Bauteildimensionen wirtschaftlich ermittelt, sondern auch Tragfähigkeitsnachweise durchgeführt werden können (vgl. Kraus & Drass 2020a, S. 22; Kraus & Drass 2020b, S. 372-373). Zudem ist es möglich sich im Anschluss an Bauteilbemessungen mithilfe KI-basierter Abläufe baukonstruktive Anschlüsse entwerfen zu lassen – bestenfalls mit mehreren Alternativen. Abschließend seien an dieser Stelle noch *Smart Homes* erwähnt, die nach der Fertigstellung eines Gebäudes mithilfe Künstlicher Intelligenz bzw. durch benutzerorientierte Anpassungen energieeffizient bzw. nachhaltig genutzt werden können (vgl. Kraus & Drass 2020a, S. 23).³⁷

Am Beispiel eines Einfamilienhauses sind nachfolgend einige KI-gesteuerte Bauprozesse mit diversen Robotern bzw. Agenten dargestellt.³⁸ Beispielsweise können zu Beginn eines Bauvorhabens für anfallende Erdarbeiten autonom fahrende Bagger und Radlader eingesetzt werden. Dabei greifen die Fahrzeuge bestenfalls nicht nur auf Informationen aus einem zentralen Modell zurück, sie melden zudem echtzeitnah zurück, dass bereits durchgeführte Arbeiten abgeschlossen sind. Für eine anschließende Einrichtung der Baustelle können mithilfe von Orientierungspunkten (z. B. durch Marker) grundlegende Absteckungen vorgenommen werden. Neben einer Verwendung von QR-Codes ist dabei auch eine Ausrichtung der Abläufe mithilfe globaler GPS-Koordinaten möglich, was im Hinblick auf intelligente bzw. rein autonome Systeme obligatorisch ist. Anhand übergeordneter Bezugspunkte können sich dann alle Maschinen und Roboter orientieren. Beispielsweise sind Kräne mit *Computer Vision* in der Lage nicht nur bereits gelieferte Bauelemente, sondern auch Bewegungen vor Ort zu erkennen (vgl. Xuehui et al. 2021, Zhou et al. 2021). Für die Herstellung einer Bodenplatte kann der angelieferte Beton bestenfalls direkt aus dem Lieferfahrzeug an die richtige Stelle gebracht werden oder die Baukräne nutzen alternativ die Computer Vision, um die notwendigen Prozesse für die Herstellung des Bauteils zu steuern. Nach dem Einbringen des Betons ist eine Verdichtung bspw. mit einem der in Abschnitt 2.4.6 erläuterten Roboter möglich. Auch das Herstellen des auf der Bodenplatte vorgesehenen Mauerwerks kann mit den bereits zuvor dargestellten Maschinen automatisch ablaufen. Auch hier ist eine Orientierung mithilfe der Computer Vision bzw. durch das Abtasten von Markern möglich. Neben den in erster Linie stationär positionierbaren Robotern spielen auf Baustellen mit Künstlicher Intelligenz darüber hinaus auch Maschinen für Transportprozesse eine große Rolle. So können nicht nur die ebenfalls in Abschnitt 2.4.6 dargestellten Seilroboter bereichsübergreifend eingesetzt werden, auch sind diverse Agenten einsetzbar, die in erster Linie verschiedene Bauelemente an die vorgesehenen Stellen bringen. Mithilfe von Greifern bzw. Ladevorrichtungen sind stets verschiedene Konzepte zur Errichtung eines Einfamilienhauses denkbar.

³⁷Auf die Thematik zu *Smart Homes* sei an dieser Stelle auf Specht (2018, S. 265) verwiesen.

³⁸Es handelt sich lediglich um ein übergeordnetes bzw. allgemeines Beispiel, bei dem Zusammenhänge und Prozesse zwischen einzelnen Robotern bzw. Agenten exemplarisch dargestellt werden.

Anhand des hier dargestellten Beispiels wird deutlich, dass es sich bei Prozessen auf *Baustellen der Zukunft* um intelligente bzw. smarte und v. a. heterogene Cyberphysische Systeme mit unterschiedlichen Agenten handelt.³⁹ Durch die in Abschnitt 2.4 aufgeführten digitalen und innovativen Neuentwicklungen werden Baustellenprozesse nach und nach mit immer stärker vernetzten Robotern bzw. Maschinen ablaufen. Da innerhalb dieser Vorgänge verschiedene Agenten miteinander kommunizieren, kann auch von *Komplexen Adaptiven Systemen* gesprochen werden. Innerhalb dieser intelligent bzw. aufeinander abgestimmten Systeme sind neben einer regelmäßigen Kommunikation infolge von Feedbacks v. a. auch Selbstorganisationsprozesse ein maßgebendes Merkmal entsprechender adaptiver Vorgänge (vgl. Carmichael & Hadzikadic 2019, S. 2).⁴⁰ Neben den zuvor angesprochenen Mehrwerten *intelligenter* Baustellen, existieren aktuell jedoch noch Probleme bzw. Schwierigkeiten. Denn obwohl KI-basierte Prozesse auch im Bauwesen immer weiter zunehmen (vgl. Pan & Zhang 2021, S. 1), sind derzeit noch viele Hürden vorhanden, die eine vollumfängliche Umsetzung autonomer Baustellen erschweren. Neben der großen Frage zur ausreichenden Bereitstellung von Energie für die digitalen Systeme, sind es v. a. noch unvollständige bzw. fehlende Datenbanken, die notwendig sind, um KI-gestützte Prozesse zu ermöglichen (vgl. Pan & Zhang 2021, S. 6-7; Xuehui et al. 2021, S. 17).

Nachdem nun im vorliegenden Abschnitt 3.3 verschiedene Aspekte potenzieller Substitutionen, möglicher Automatisierungen, zunehmender Mensch-Maschine-Interaktionen sowie denkbarer Cyberphysischer Systeme auf Baustellen aufgeführt wurden, sind im nachfolgenden Abschnitt explizite Besonderheiten thematisiert, die unter branchenspezifischen Gesichtspunkten beim Erstellen von Bauwerken im Rahmen der Digitalisierung berücksichtigt werden müssen.

³⁹Zu heterogenen Robotersystemen siehe auch Winfield (2012, S. 88).

⁴⁰Als weitere *Komplexe Adaptive Systeme* können bspw. auch Gehirnzellen, Ameisenkolonien oder soziale Verhaltensweisen von Menschen angesehen werden (vgl. Carmichael & Hadzikadic 2019, S. 1).

3.4 Effekte der Digitalisierung auf baustellenspezifische Besonderheiten

Im Gegensatz zur stationären bzw. industriellen Fertigung sind Prozesse zur Errichtung von Bauwerken unter branchenspezifischen und teilweise schwierigen Randbedingungen bzw. charakteristischen Voraussetzungen stets gesondert zu betrachten (vgl. Forbau 2012, S. 1; Kohlbecker 2013, S. 9; Oesterreich & Teuteberg 2016, S. 1435; Hafner & Berlack 2018, S. 49; Salmi et al. 2018, S. 26). Sofern es sich bspw. nicht um die Herstellung von Betonfertigteilen oder das Errichten von Windkraftanlagen handelt (vgl. Hausknecht & Liebich 2016, S. 147), ist durch die Tatsache, dass im Rahmen arbeitsteiliger und handwerklicher Tätigkeiten keine Massenprodukte hergestellt werden, eine immer gleich bleibende Herstellungs- und Vorgehensweise in den meisten Fällen nicht möglich. Geht es darum Baustellenarbeitsprozesse infolge Digitalisierung zu analysieren und die damit einhergehenden Modifikationen an vorhandene Vorgänge anzupassen, müssen folglich „industriekulturelle Besonderheiten“ (Rauner 2006, S. 560) berücksichtigt werden.

Nachfolgend werden diesbezüglich sechs branchen- bzw. bauspezifische Aspekte aufgeführt, die im Hinblick auf anstehende Veränderungen mit Vor- und Nachteilen diskutierend dargestellt sind. Beginnend mit der Tatsache, dass es sich bei der Herstellung von Bauwerken fast ausschließlich um Unikate handelt, wird daran anknüpfend aufgeführt, dass die damit einhergehenden wechselnden Arbeitsorte ebenfalls eine wesentliche Rolle spielen. Auch werden im vorliegenden Abschnitt die instabilen Wetterbedingungen, die bereits angesprochenen komplexen Herausforderungen bauleistungsprozessorientierter Abläufe, die heterogenen bzw. vielfältigen Arbeitstätigkeiten sowie die interoperablen und auf Baustellen häufig vorkommenden Gewerkeschnittstellen thematisiert. Abschließend ist übersichtlich dargestellt, welche wesentlichen Faktoren der Digitalisierung im Hinblick auf die Einbindung in Baustellenarbeitsprozesse zu berücksichtigen sind.

Objektvielfalt und Unikat-Herstellung

Einer der am häufigsten genannten Unterscheidungsgründe des Bauwesens zu anderen Branchen ist das mit jedem neuen Bauvorhaben verbundene einmalige Herstellen von Unikaten (vgl. Meyser & Uhe 2006, S. 152; Forbau 2012, S. 1; Jehle et al. 2013, S. 21; Rathswohl 2014, S. 1; Hausknecht & Liebich 2016, S. 147; Oesterreich & Teuteberg 2016, S. 1430; Schönbeck 2016, S. 284; Schreyer 2016, S. 33; Krause 2017, S. 375; Hafner & Berlack 2018, S. 49). Ein zu errichtendes Bauobjekt ist nicht nur jedes Mal neu zu entwerfen und zu konstruieren, auch die daran anschließenden Baustellenprozesse vor Ort müssen stets an die spezifischen Planungen angepasst werden (vgl. Syben 2010, S. 17). Somit stellt nicht nur das fertiggestellte Bauvorhaben mit seiner Einzigartigkeit eine Besonderheit dar (vgl. Helmus 2009, S. 27; Saidi et al. 2016, S. 1494), auch die mit der Errichtung des Objektes einhergehenden individuellen und gewerkeübergreifenden Bauleistungen haben einen Charakter von Unikaten (vgl. Rathswohl 2014, S. 6; Hausknecht & Liebich 2016, S. 147; Silbe 2017, S. 11). Da sich Baustellen stets an die geplanten Bauwerke und die vorzufindenden Standortbedingungen anpassen müssen, sind die damit

einhergehenden arbeitsprozessrelevanten und häufig sehr komplexen Bedingungen bei der Erstellung von Einzelanfertigungen zu berücksichtigen (vgl. Poppy et al. 1995, S. 101; Helmus 2009, S. 26; Syben 2010, S. 17; Oesterreich & Teuteberg 2016, S. 1430). Im Hinblick auf die Digitalisierung von Baustellen sei bei der Erstellung von Unikaten insbesondere die Methode BIM genannt, bei der, wie bereits in Abschnitt 2.3 dargestellt, alle projektspezifischen Aspekte und Besonderheiten nicht nur zentral, sondern im besten Fall darüber hinaus auch detailgetreu abrufbar sind. Entsprechende Vorteile von BIM werden damit sofort ersichtlich.

Instationäre Arbeitsumgebungen

Durch häufig wechselnde Arbeitsumgebungen sind Bauarbeitsprozesse – wie etwa das Einrichten von Baustellen oder das Beschaffen bzw. Anliefern projektrelevanter Materialien – an die jeweiligen örtlichen Umgebungen anzupassen. Dies erfordert nicht nur Kenntnisse über die an den Baubereich angrenzenden Einzugsgebiete, sondern auch Flexibilitäten im Umgang mit den immer neu vorzufindenden Situationen. Schon im Vorfeld der eigentlichen Bauarbeiten sind daher aufgrund instationärer Bedingungen die entsprechenden Arbeitsgänge sehr gut durchzuplanen. Durch stetige Wechsel der Produktionsorte ändern sich aber nicht nur die jeweiligen, immer wieder neu zu berücksichtigenden Standortbindungen der Bauobjekte im Rahmen ihrer örtlichen Gegebenheiten, sondern auch die mit unterschiedlichen Grundstücken einhergehenden Gelände- und Bodenbeschaffenheiten (vgl. Klindt & Klindt 1999, o. S.; Meyser & Uhe 2006, S. 152; Helmus 2009, S. 26; Syben 2010, S. 17; Jehle et al. 2013, S. 21; Kohlbecker 2013, S. 9; Rathswohl 2014, S. 6; Oesterreich & Teuteberg 2016, S. 1430; Saidi et al. 2016, S. 1493; Schönbeck 2016, S. 283-284; Krause 2017, S. 375).

Neben einer logistisch sinnvollen Anbindung der jeweiligen Baustellen, z. B. für Anlieferungen von Transportbeton, sind auch Anreise- und Parkmöglichkeiten der Baufacharbeiterinnen und Baufacharbeiter stets zu berücksichtigen. Damit einher gehen ebenfalls Überlegungen zu Unterbringungen des Baustellenpersonals, wenn z. B. Montagearbeiten erforderlich sind. Betrachtet man die instationären Arbeitsbedingungen im Hinblick auf die anstehenden Veränderungen infolge Digitalisierung, so kann festgehalten werden, dass neben den hier angerissenen Schwierigkeiten auch viele aussichtsreiche Möglichkeiten zur Nutzung digitaler Optionen bestehen. So ist es insbesondere aus baulegistischer Sicht zukünftig sinnvoll viele Baustellenarbeitsprozesse mithilfe der in Abschnitt 2.4.4 dargestellten Auto-ID-Techniken zu steuern und zu überwachen. Durch die Verknüpfung mit GPS ist es somit jederzeit möglich anhand mobiler Software-Applikationen zu erfassen, welche Abläufe gelenkt werden müssen bzw. welche weiteren logistischen Aufgaben noch anstehen. Anlieferungen können dabei nicht nur *just-in-time* erfolgen, auch helfen digitale Navigationssysteme ortsunkundigen Lkw-Fahrerinnen und -fahrern, die benötigten Baumaterialien an die für einen optimalen Bauablauf vorgesehenen Stellen zu liefern.

Umweltbedingte Witterungseinflüsse

Für die Einbindung digitaler Arbeits- und Hilfsmittel auf Baustellen sind insbesondere die häufig unvorhersehbaren Wetterbedingungen zu berücksichtigen. Da die Errichtung von Bauwerken i. d. R. unter freiem Himmel stattfindet, bestehen starke Abhängigkeiten infolge stetig wechselnder Witterungs- und Klimaeinflüsse (vgl. Poppy et al. 1995, S. 93; Helmus 2009, S. 27; Forbau 2012, S. 1; Kohlbecker 2013, S. 9; Oesterreich & Teuteberg 2016, S. 1431; Saidi et al. 2016, S. 1493; Schönbeck 2016, S. 283; Klemt-Albert et al. 2018, S. 191). Die bspw. durch Wind, Regen, Hitze, Schnee oder Kälte hervorgerufenen Unvorhersehbarkeiten treten in erster Linie durch die geographische Lage der jeweiligen Baustellen und ebenfalls durch die zyklisch immer wiederkehrenden jahreszeitlichen Effekte auf. Da Automatisierungen zur Herstellung hochwertiger Produkte jedoch weitestgehend kontrollierbare Umgebungen ohne negative Einwirkungen durch unerwünschte Umwelteinflüsse erfordern (vgl. Schreyer 2016, S. 53), müssen Maschinen und Werkzeuge entwickelt werden, die den besonderen Baustellenbedingungen standhalten und somit unter verschiedenen Witterungseinflüssen funktionieren können (vgl. Poppy et al. 1995, S. 93; Bock & Linner 2015, S. xxii-xxiii). Da die meisten Roboter bisher jedoch noch anfällig gegen viele der oben genannten Witterungseinflüsse sind, können sie i. d. R. nur unter speziellen Bedingungen eingesetzt werden. So ist die bereits in Abschnitt 2.4.2 dargestellte Augmented Reality sowohl bei starker Sonneneinstrahlung, als auch bei leichtem Regen bspw. nur bedingt oder gar nicht einsetzbar. Insbesondere bei Niederschlägen werden über die eigentliche Nutzung digitaler Arbeits- und Hilfsmittel im Freien weitere Probleme ersichtlich. So entscheiden Baufacharbeiterinnen und Baufacharbeiter bei einsetzendem Regen bspw. ad hoc, dass alle elektronischen bzw. wasseranfalligen Geräte zu schützen sind bzw. dass diese abgedeckt werden müssen.

Selbst wenn Roboter bereits heute aufgrund eingebauter Feuchtigkeitssensoren in der Lage sind entsprechende Entscheidungen ebenfalls zeitnah treffen zu können, so ist bei einsetzendem Niederschlag noch nicht klar welche der vorhandenen digitalen Werkzeuge – oder auch Bauteile – als erstes vor Regen geschützt werden müssen. Obwohl diese Herausforderungen auf Grundlage eines zur Verfügung gestellten digitalen Katalogs ebenfalls gelöst werden könnten, sind entsprechende Entscheidungen im Rahmen von Baustellenarbeitsprozessen vor Ort nur bedingt von Maschinen durchführbar. Ein erheblicher Vorteil im Hinblick auf Witterungseinflüsse ist jedoch ein ebenfalls bereits angesprochenes und während der Planung mit Attributen versehenes BIM-Modell, welches neben reinen baustoffbezogenen Daten auch kombinierte Informationen zu einzelnen Arbeitsprozessen und bestimmten klimatischen Vorbedingungen beinhalten kann, die dann in relevanten Fällen, z. B. bei zu großer Kälte, bereitgestellt werden. So ist es u. a. möglich, dass bei Betoniervorgängen angezeigt wird, wenn die Umgebungstemperatur für das Einbringen des Betons zu niedrig ist. Entsprechende witterungsbedingte Informationen können über die eigentlichen Tätigkeiten zur Errichtung der Bauwerke hinaus – und im Hinblick auf die Sicherheit der Baufacharbeiterinnen und Baufacharbeiter vor Ort – ebenfalls für Unwettervorhersagen herangezogen werden.

Komplexe Baustellenlogistik und begrenzte Lagerhaltung

Eng verknüpft mit den sich stetig ändernden Arbeitsorten sind die bereits mehrfach erwähnten logistischen Vorgänge auf Baustellen. Neben optimal abgestimmten Prozessen, z. B. im Hinblick auf projektbezogene Anlieferungen von Materialien oder Baustoffen, stellen ebenfalls komplexe Koordinationsvorgänge, z. B. beim Einsatz von Baumaschinen und Werkzeugen, große Anforderungen an die Bauablaufplanung und darüber hinaus auch an die vor Ort agierenden Personen. Im Rahmen der Baulogistik, die nicht nur einer Vielzahl branchenspezifischer Rahmenbedingungen unterliegt, sondern ebenfalls bei jedem Bauvorhaben neu zu formieren ist, werden Objekte häufig auf herkömmliche Weise mit Farbmarkierungen, Aufklebern oder Stiften gekennzeichnet (vgl. Helmus 2009, S. 27 und S. 663). Durch das Vorhandensein verschiedener unternehmensinterner oder projektbezogener Liefer- bzw. Transportketten (vgl. Gillies 2017, S. 18), stellen entsprechende unstrukturierte Kennzeichnungen Beteiligte auf Baustellen jedoch teilweise vor unvorhersehbare organisatorische Probleme (vgl. Saidi et al. 2016, S. 1497). So sind ggf. prozessbedingte Anpassungen notwendig, wenn Materialien nicht auffindbar oder Werkzeuge in einer nicht ausreichenden Anzahl vorhanden sind. Ein damit verbundenes aufwendiges Suchen von Bauelementen oder Arbeitsmitteln ist nicht nur aus Facharbeitersicht lästig und unerwünscht, es verzögert ggf. auch erheblich den Bauablauf.

Über ein entsprechendes Umorganisieren hinaus sind ebenfalls verschiedene Beziehungen, z. B. zu anderen Gewerken oder zu Lieferanten, stellenweise so flüchtig (vgl. Gillies 2017, S. 18), dass logistische Abläufe nur bedingt optimal stattfinden können. Dies betrifft insbesondere auch die auf Baustellen häufig begrenzten Möglichkeiten zu Lagerung von Bauelementen. Die oftmals sehr geringen Platzkapazitäten stellen die meisten Baulogistikplanungen im Hinblick auf die eingeschränkten Bedingungen und Abhängigkeiten vor große Herausforderungen (vgl. Helmus 2009, S. 27; Gillies 2017, S. 18). So sind insbesondere auch für die Arbeitstätigkeiten im Massivbau große Flächen zur Lagerhaltung notwendig, auf denen nicht nur Paletten von Mauerwerkssteinen, sondern auch Schalenelemente oder Bewehrungen zwischengelagert werden können. Häufig muss ein Großteil der Güter, die auf Baustellen angeliefert werden, auch direkt nach Annahme verbaut werden, da keine ausreichenden Flächen zur Zwischenlagerung vorhanden sind.

Mithilfe übergeordneter digitaler Systeme sind logistische Prozesse in Zukunft jedoch besser plan- und umsetzbar. Da sich nicht nur im Bauwesen Verkehrssysteme ändern bzw. immer mehr Roboter integriert werden (vgl. Jordan 2017, S. 33), sind flächendeckende Koordinierungs- und Kontrollsysteme auch auf Baustellen denkbar und möglich. Durch Nutzung verschiedener digitaler Innovationen, wie die zuvor dargestellten Sensor- oder Lasertechnologien, können Bauprozesse – auch unter Zuhilfenahme von GPS oder der in Abschnitt 2.4.4 dargestellten Auto-ID-Technik – in Zukunft vermehrt *just-in-time* ablaufen (vgl. Helmus 2009, S. 27; Gillies 2017, S. 18).

Heterogene Aufgaben und komplexe Arbeitsprozesse

Betrachtet man einzelne Handlungen auf Baustellen, so kann auch hier festgestellt werden, dass im Vergleich zu stationären Fertigungen erhebliche Unterschiede bestehen. Beispielsweise müssen die jeweiligen vor Ort stattfindenden handwerklichen Tätigkeiten nicht nur auf eine fachgerechte Ausbildung der einzelnen Bauteile hin durchgeführt werden, auch sind die einzelnen Vorgänge i. d. R. von den Baufachkräften in einen übergeordneten projektspezifischen Gesamtzusammenhang zu bringen. So müssen Facharbeiterinnen und Facharbeiter neben einem grundlegenden technischen Verständnis zur Herstellung der Bauwerke nicht nur planerische Weitsicht aufweisen, sondern darüber hinaus ebenfalls Entscheidungen im Rahmen sehr komplexer Arbeitsprozesse treffen, die häufig wiederum auf mannigfaltigen und umfangreichen Regelwerken, z. B. DIN-Normen oder Baustoffrichtlinien, beruhen (vgl. Hausknecht & Liebich 2016, S. 24; Schönbeck 2016, S. 284; Silbe 2017, S. 11). Eine entsprechende Komplexität spiegelt sich auch in der Vielzahl zeichnerischer Darstellungen, z. B. in Form von Grundrissen, Schnitten, Ansichten oder Details, sowie der Nutzung vieler unterschiedlicher Baustellengeräte und Materialien wider (vgl. Kohlbecker 2013, S. 10; Hausknecht & Liebich 2016, S. 24 und S. 30).

Aber nicht nur grundlegende fachtheoretische oder rein praxisbezogene Faktoren spielen bei handwerklichen Tätigkeiten auf Baustellen eine wesentliche Rolle. So ist neben den umfangreichen, heterogenen und vielschichtigen Arbeitsaufgaben ebenfalls zu berücksichtigen, dass trotz hoher Gewerkevielfalt zwar bereichsübergreifende Abläufe vorzufinden sind, jedoch nur wenige arbeitsteilige Prozesse bei der Errichtung von Bauwerken stattfinden (vgl. Meyser & Uhe 2006, S. 152-153; Syben 2010, S. 17; Mersch & Kulcke 2014, S. 25; Hausknecht & Liebich 2016, S. 147; Oesterreich & Teuteberg 2016, S. 1430 und S. 1435; Schönbeck 2016, S. 283-284).⁴¹

Auch müssen im Rahmen komplexer Baustellenarbeitsprozesse temporäre Bauzustände oder bautechnisch bedingte Wartezeiten, z. B. bei der Trocknung bzw. Aushärtung von Baustoffen, sowie darüber hinaus oftmals verunreinigte Arbeitsumgebungen berücksichtigt werden (vgl. Helmus 2009, S. 27; Klemm-Albert et al. 2018, S. 191). Die hier skizzierten Zusammenhänge werden im Zuge der Digitalisierung – insbesondere infolge von BIM und den damit einhergehenden Informatisierungsprozessen – die bereits bestehenden komplexen Gegebenheiten im Hinblick auf notwendige Kompetenzen von Baufachhandwerkerinnen und Baufachhandwerkern erweitern (vgl. Wischmann & Hartmann 2018, S. 14). Einige baustellenspezifische Aspekte wurden diesbezüglich bereits thematisiert, z. B. bei der digitalen Dokumentation von Arbeitsprozessen in Abschnitt 3.1.1. Die aus den hier kurz dargestellten Veränderungen resultierenden Konsequenzen werden in der vorliegenden Arbeit in Kapitel 4 weiterbehandelt.

⁴¹ Aspekte nicht-routinierter Arbeitshandlungen wurden bereits in Abschnitt 3.2: *Automatisierungswahrscheinlichkeiten von Baustellentätigkeiten* behandelt.

Interoperabilitäten und Gewerkeschnittstellen

Anknüpfend an die zuvor thematisierten Aspekte im Hinblick auf einzelne komplexe Arbeitstätigkeiten, ist stets zu berücksichtigen, dass auf Baustellen nicht nur eingespielte und aufeinander abgestimmte Teams, sondern häufig durchmischte und stellenweise auch konkurrierende Arbeitsgruppen, aufeinandertreffen. Eine dem Bauwesen innewohnende und bereits in der Planungsphase beginnende fragmentierte Wertschöpfungskette (vgl. Forbau 2012, S. 1; Oesterreich & Teuteberg 2016, S. 1431) findet ihren Höhepunkt in eben diesen vor Ort zusammengesetzten und miteinander verwobenen Strukturen. So interagieren auf Baustellen nicht nur viele unterschiedliche unternehmensinterne Arbeitskolonnen, sondern ebenfalls zahlreiche und häufig inhomogen miteinander verknüpfte Gewerke und Unternehmen bei der Abwicklung spezifischer Bauvorhaben (vgl. Klindt & Klindt 1999, o. S.; Berbig et al. 2003, S. 1; Meyser & Uhe 2006, S. 152-153; Jehle et al. 2013, S. 28; Kohlbecker 2013, S. 9; Kölzer & Ranke 2014, S. 38; Saidi et al. 2016, S. 1494).

Neben kleinen Bauprojekten – bei denen im Rahmen von Rohbauarbeiten bereits bis zu 13 Gewerke beschäftigt sein können (vgl. Kohlbecker 2013, S. 9) –, sind es bei größeren Vorhaben stellenweise über 50 verschiedene Auftragnehmerinnen und Auftragnehmer, die an der Erstellung eines Bauwerks beteiligt sind (vgl. Bahlau & Klemt-Albert 2018, S. 287; Hafner & Berlack 2018, S. 49). In einer statistischen Erhebung wurde im Zuge der Unternehmensanalyse einer kanadischen Baufirma ermittelt, dass im Rahmen von Großprojekten sogar bis zu 420 Baufirmen (inkl. aller Zulieferer und Subunternehmer) und rund 850 Personen Beteiligung finden können (vgl. Hausknecht & Liebich 2016, S. 24). Aber nicht die alleinige hohe Anzahl von Baufacharbeiterinnen und Baufacharbeitern ruft Probleme und Herausforderungen in den unterschiedlichen Baustellenarbeitsprozessen hervor, sondern vielmehr die Tatsache, dass die Akteurinnen und Akteure nicht nur zeitgleich bzw. parallel an der Errichtung eines Bauwerks beteiligt sind, sondern darüber hinaus auch aufgrund gegenseitiger Abhängigkeiten und Wechselbeziehungen ebenfalls in einem komplexen gewerkeübergreifenden Miteinander stehen (vgl. Kohlbecker 2013, S. 9; Rathswohl 2014, S. 7; Mersch 2016, S. 166; van Renssen et al. 2016, S. 15; Silbe 2017, S. 11). Die komplexen Verhältnisse weiten sich aufgrund der in Deutschland vorzufindenden Unternehmensstruktur innerhalb der Baubranche, die eine sehr hohe Anzahl an kleinen und mittelständischen Betrieben aufweist (vgl. Meyser & Uhe 2006, S. 153; Oesterreich & Teuteberg 2016, S. 1431; Glock 2018, S. 617; Hafner & Berlack 2018, S. 49), auch auf Auseinandersetzungen mit weiteren branchen- bzw. projektspezifischen Beteiligten aus, z. B. mit Auftraggebern, Planern, Behörden, Subunternehmen oder anderen Handwerkern (vgl. Berbig et al. 2003, S. 1; Meyser & Uhe 2006, S. 152; Helmus 2009, S. 6 und S. 26; Jehle et al. 2013, S. 26 und S. 28; Rathswohl 2014, S. 6; Borrmann et al. 2015, S. 2; Hausknecht & Liebich 2016, S. 147; Oesterreich & Teuteberg 2016, S. 1431 und S. 1435).⁴²

⁴²Eine Übersicht über die Struktur von Bauunternehmen in Deutschland findet sich in Abschnitt 4.4: *Übersicht zur Struktur des Bauwesens in Deutschland.*

Durch die vielen verschiedenen Interaktionen auf Baustellen müssen sich die Fachkräfte nicht nur bei komplexen Großbauvorhaben, sondern insbesondere auch bei unstrukturierten oder schlecht abgestimmten Projekten auf immer neue Bezugspersonen einstellen (vgl. Kohlbecker 2013, S. 9; Saidi et al. 2016, S. 1494; Gillies 2017, S. 18; Silbe 2017, S. 11; Hafner & Berlack 2018, S. 49). Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass v. a. in der Bauindustrie eine hohe Anzahl von un- bzw. angelernten Arbeiterinnen und Arbeitern – die teilweise verschiedene kulturelle Hintergründe aufweisen (vgl. Kohlbecker 2013, S. 9) – beschäftigt ist. All diese Erkenntnisse machen neben der Tatsache, dass i. d. R. nur unzureichende bzw. nicht auf einen gemeinsamen Erfolg ausgerichtete Kooperationen zwischen einzelnen Baugewerken vorherrschen, ein Einspielen in kompetente und lange zusammenarbeitende Teams sehr schwierig (vgl. Hafner & Berlack 2018, S. 50). Eine konsistente Planung mit erforderlichen Aufgabenverteilungen bzw. Informations-Austauschszszenarien ist somit schon aufgrund der bereits traditionell existierenden interoperablen und gewerkeübergreifenden Bedingungen sehr vielfältig und komplex (vgl. Schreyer 2016, S. 65; Bahlau & Klemm-Albert 2018, S. 287). Auch die notwendigen Informationshandhabungen werden durch die Beteiligung mehrerer – jedoch stets nicht aller – Akteurinnen und Akteure häufig erschwert (vgl. Jehle et al. 2013, S. 21-22). So stellen nicht nur die zeitlich begrenzten und stellenweise auch lokal eingeschränkten Verfügbarkeiten von Informationen Probleme dar, sondern auch die Tatsache, dass mehrere Verfasser/-innen bzw. Nutzer/-innen auf unterschiedlichste Arten und Weisen Daten beziehen oder weitergeben (vgl. ebd.).

Um die täglich anfallenden Arbeitsaufgaben nun im Rahmen entsprechender Gegebenheiten bewältigen und damit gleichzeitig zu einem Gelingen der verschiedenen Bauvorhaben beitragen zu können (vgl. Borrman et al. 2015, S. 2), sind nicht nur bauzeitliche Überschneidungen zu berücksichtigen, sondern auch die für die Interaktionen wichtigen sozialen Kompetenzen stets mit einzubeziehen. So erfordern die Schnittstellen neben planungs- und fachübergreifenden Fähigkeiten, ebenfalls flexible und variable Verhaltensweisen aller Projekt- und Baubeteiligten (vgl. Berbig et al. 2003, S. 1; Rathswohl 2014, S. 7; Schönbeck 2016, S. 285; Krause 2017, S. 375). Um also bei zunehmender Digitalisierung die bereits bestehenden Prozesse mit ihren vielfältigen Schnittstellen zwischen den einzelnen Unternehmen nicht nur aufrecht zu erhalten (vgl. Borrman et al. 2015, S. 3), sondern darüber hinaus auch zu verbessern, gilt es die vorhandenen Informatisierungsprozesse zu analysieren und im Hinblick auf die anstehenden Veränderungen – die insbesondere durch BIM hervorgerufen werden – anzupassen. Als Beispiel sei an dieser Stelle das *BIM Collaboration Format (BCF)* genannt, das im Rahmen von BIM eine Möglichkeit für das Managen der komplexen Kommunikationen bereitstellt. Die notwendigen Anpassungen beziehen sich jedoch nicht nur auf die mannigfaltigen Kommunikationsformen, sondern ebenfalls auf die damit verbundenen Rollen- und Aufgabenverteilungen und damit direkt auch auf die Inhalte von Ausbildungs- und Lehrplänen. Diese Aspekte werden im nachfolgenden Kapitel durch Analysen der Informatisierung (Abschnitt 4.1) und der Kommunikation (Abschnitt 4.2) auf Baustellen weitergehend betrachtet.

Zusammenfassung der Erkenntnisse zu baustellenspezifischen Besonderheiten

Alle sechs hier aufgeführten und im Hinblick auf die Digitalisierung diskutierten Besonderheiten auf Baustellen werden nachfolgend durch zusätzlichen Rückgriff auf die bereits in Abschnitt 3.1.1 thematisierten Veränderungen abschließend für das vorliegende Kapitel 3 zusammengefasst. Da es, wie zuvor gezeigt, bei der Errichtung von Bauwerken nur sehr wenige Standardprozesse gibt (vgl. Gillies 2017, S. 18) und die bereits bestehende Komplexität durch die Einbindung innovativer Technologien darüber hinaus ebenfalls immer weiter zunimmt (vgl. Glock 2018, S. 617), können, anders als in stationären Fertigungsprozessen, erheblich weniger Tätigkeiten und Prozesse substituiert bzw. automatisiert werden. Eine verstärkte Digitalisierung kann jedoch auch im Hinblick auf das Erstellen von Einzelanfertigungen genutzt werden. So sind durch die Verwendung eines zentralen Informationsmodells, auf das möglichst viele Beteiligte Zugriff haben sollten, alle projektspezifischen Daten i. d. R. nicht nur aktuell, sondern im besten Fall auch ausreichend detailliert vorhanden. Zudem ist der hohe kommunikative Aufwand bei der Herstellung von Unikaten mithilfe einer gemeinsamen Plattform besser koordinierbar. Auch die zuvor angesprochenen Schwierigkeiten einer instationären Errichtung von Bauwerken können mithilfe übergeordneter digitaler Systeme nicht nur unterstützt, sondern bestenfalls sogar gesteuert oder kontrolliert werden. Hier bietet ebenfalls ein zentrales BIM-Modell, das bspw. mit RFID-Tags oder GPS-Daten verknüpft ist, die Grundlage für viele bauleistungsbezogene Vorgänge während der Ausführung. Im Hinblick auf die Problematik umweltbedingter Witterungseinflüsse kann festgehalten werden, dass bei Verwendung digitaler Arbeits- und Hilfsmittel auf Baustellen neben einigen Vorteilen, z. B. dem Abrufen von Wetterdaten, auch Nachteile, wie etwa Wasser- oder Sonnenempfindlichkeiten, bestehen.

Positiv sind wiederum Möglichkeiten, die im Rahmen von Baustellenkoordinationen oder bei einer effektiven Lagerhaltung, genutzt werden können. So ist es von großem Vorteil, wenn relevante Prozesse mithilfe eines Digitalen Zwillings nicht nur frühzeitig planbar sind, sondern wenn darüber hinaus die vor Ort stattfindenden Abläufe auch besser nachvollzogen oder kontrolliert werden können. Betrachtet man die eigentlichen Tätigkeiten der Baufachhandwerkerinnen und Baufachhandwerker vor Ort, so lässt sich festhalten, dass die meisten Handlungen, die zur Errichtung von Bauwerken notwendig sind, i. d. R. nicht-routinierte Abläufe darstellen. Somit ist insbesondere bei den heterogenen Tätigkeiten auf Baustellen davon auszugehen, dass diese nicht nur schwerer durch digitale Arbeitsmittel oder Roboter zu ersetzen sind, sondern dass sie trotz anschaulicher Visualisierungen auf Grundlage von BIM-Modellen viele der komplexen Vorgänge vorerst lediglich nur unterstützen können. Insbesondere im Hinblick auf die während der Errichtung von Bauwerken existierenden Interoperabilitäten und Gewerkeschnittstellen bietet die Digitalisierung jedoch wiederum durch die gemeinsame Kommunikation über zentrale BIM-Modelle erhebliche Vorteile. Aufgrund der im vorliegenden Kapitel aufgeführten Aspekte kann festgehalten werden, dass im bestehenden Gefüge der Bauausführung grundlegende Veränderungen infolge struktureller Anpassungen jedoch häufig nur schwer umzusetzen sind (vgl. Hafner & Berlack 2018, S. 50).

4 Informatisierungs- und Kommunikationsprozesse auf Baustellen

4.1 Informatisierung und Wissensmanagement auf Baustellen

Aufbauend auf den bisher gewonnenen Erkenntnissen aus den Kapiteln 2 und 3 werden im vorliegenden Teil des Forschungsvorhabens weitere Aspekte betrachtet, die im sozio-technischen System Baustelle in Zukunft vermehrt in den Fokus gerückt werden sollten. Dafür ist nachfolgend zuerst aufgeführt, wie die bereits zuvor erwähnten Informatisierungsprozesse innerhalb des Bauwesens – und insbesondere für Abläufe auf Baustellen – aufzufassen sind. Im Zuge der damit einhergehenden Analysen wird ebenfalls der Begriff des *Wissensmanagements* behandelt. Anknüpfend an diese ermittelnden Befunde wird in Abschnitt 4.2 dargelegt, wie traditionelle Kommunikationsvorgänge auf Baustellen stattfinden und wie sich diese in Zukunft durch die Effekte der Digitalisierung – und insbesondere durch die Methode BIM – verändern werden. Im Zusammenhang mit den daraus abgeleiteten Erkenntnissen wird in Vorbereitung für die Online-Umfrage zum aktuellen Stand zur Informatisierung und Kommunikation auf Baustellen – deren Erstellung und Ergebnisse in Kapitel 5 zu finden sind – in Abschnitt 4.3 zuvor dargelegt, wie intensiv digitale Arbeits- und Hilfsmittel in Deutschland bereits branchenübergreifend eingesetzt werden. Um diese Befunde mit dem Bauwesen zu verknüpfen wird anschließend in Abschnitt 4.4 aufgeführt, dass ein Großteil der Bauunternehmen in Deutschland kleine und mittelständische Betriebe sind. Die Inhalte der nachfolgenden Abschnitte dienen in erster Linie der Analyse bestehender und zukünftiger Informatisierungs- und Kommunikationsvorgänge, die sich im Hinblick auf eine verstärkte Anwendung der Methode des Building Information Modeling grundlegend verändern werden.

Der Begriff der Informatisierung im Rahmen der Digitalisierung

Um ein besseres Verständnis für die Nutzung von Informationen innerhalb von Baustellenarbeitsprozessen zu bekommen, wird nachfolgend der Begriff der *Informatisierung* erörtert. Nach einer allgemeinen Definition sind neben generellen Schwierigkeiten von Informationsweiterleitungen im Bauwesen explizit auch Erörterungen zum sog. *Wissensmanagement* aufgeführt. An diese Erkenntnisse anknüpfend werden die mit der Informatisierung einhergehenden Prozesse auf Baustellen – insbesondere von kleinen und mittelständischen Unternehmen – sowie die Notwendigkeit von Wissen hinsichtlich Informatisierungsprozessen von Baufacharbeiterinnen und Baufacharbeiter behandelt.

Die Geschichte der Informatisierung hat weit vor der Verwendung der ersten Computer begonnen (vgl. Boes et al. 2014, S. 8).¹ Bereits in den 1950er Jahren wurde im Rahmen der *Mathematischen Kommunikationstheorie* der Begriff der Information mit den Sozial- und Verhaltenswissenschaften vereinigt (vgl. Chomsky 1968, S. 12). Seit den 1990er Jahren hat die Informatisierung dann v. a. durch das Internet einen grundlegenden Wandel – insbesondere auch im Hinblick auf Arbeitsprozesse – erfahren (vgl. Krings & Fiedeler 2005, S. 120). Ein mit diesen Auswirkungen einhergehender sozialer Prozess des Sammelns von Informationen oder auch der Verwaltung von Daten in Informationssystemen kann heute gemeinhin als Informatisierung verstanden werden (vgl. Boes et al. 2014, S. 6). In einem entsprechenden Prozess werden relevante Inhalte – ausgehend von einem Urheber – entsendet, um sie dadurch anderen Beteiligten (Empfängern) wieder zugänglich zu machen.² Dazu muss der jeweilige Informationsgebrauch materialisiert bzw. in eine gegenständliche Form gebracht und in einem Tauschprozess in überindividuell nutzbare Informationen überführt werden. Eine fortwährende Erzeugung, Reproduktion und Weiterentwicklung von Informationen – und auch der damit verbundenen Informationssysteme – lässt sich kurz als Prozess der Informatisierung bezeichnen (vgl. ebd.).

Im Hinblick auf Arbeitsprozesse kann Informatisierung als ein Erzeugen, Nutzen, Auswerten und Verarbeiten nicht nur technischer, sondern auch organisatorischer Daten gesehen werden, bei denen Zusammenhänge analysiert und auch optimiert werden (vgl. Poppy et al. 1995, S. 93; Zeller et al. 2004, S. 52; Krings & Fiedeler 2005, S. 120; Boes et al. 2014, S. 7). Innerhalb des Bauwesens sind die zuvor in Abschnitt 3.4 dargestellten komplexen Arbeitsprozesse im Rahmen der Digitalisierung und im Hinblick auf die damit verbundenen neuen Arten der Kommunikation, der Datengewinnung und der Verarbeitung, insbesondere auch aus wissenschaftlicher Sicht und unter Einbeziehung beruflicher Facharbeit zu analysieren (vgl. Schilcher & Diekmann 2014, S. 1 und S. 11; Apel & Apt 2017, S. 71; BMBF 2017, o. S.). Dabei gewinnt insbesondere das mit diesen Aspekten verbundene Themengebiet des *Wissensmanagements* im Rahmen einer subjektzentrierten Informationshandhabung und einem damit einhergehendem Wissen für Arbeit und den ebenfalls damit verbundenen Organisationsprozessen zunehmend an Bedeutung (vgl. Schilcher & Diekmann 2014, S. 22 und S. 26).

Informatisierung im Bauwesen

Die Weitergabe von Informationen im Bauwesen ist im Vergleich zu anderen Branchen gesondert zu betrachten. Viele der zu vermittelnden Informationen basieren auf komplexen Kommunikationsformen. Neben dem Lesen von Bauplänen – für das verschiedene Konventionen, z. B. hinsichtlich Strichstärken oder Schraffuren, bekannt sein müssen – spielt insbesondere die Tatsache, dass für jedes geplante Bauwerk neue Konstruktions-

¹In Pfeiffer (2010) wird der Beginn der Informatisierung mit der Buchführung im 13. Jahrhundert benannt (ebd., S.249-250).

²Der Informationsaustausch zwischen Sendern und Empfängern wird im vorliegenden Abschnitt noch genauer beschrieben; siehe dazu auch Abb. 4.6.

unterlagen erstellt werden müssen, eine wesentliche Rolle. Darüber hinaus besteht im Bauwesen häufig das Problem, das zu Beginn oder während einer Bauausführung keine aktuellen Planungsstände vorliegen, so dass oftmals auch bei bereits begonnenen Bauwerkserstellungen noch Änderungen an der Planung vorgenommen werden und somit in einzelnen Phasen keine korrekten bzw. unterschiedliche Informationen vorhanden sind (vgl. Eschenbruch 2017, S. 387).

Abb. 4.1 zeigt die für das Bauwesen gängigen Varianten möglicher Übermittlungswege von Informationen. Um bestenfalls alle Informationen nachhaltig festhalten zu können, bieten sich optische Mittel in schriftlicher oder zeichnerischer Form an. Obwohl dreidimensionale Bauwerksmodelle die herkömmlichen 2D-Zeichnungen in Zukunft immer mehr verdrängen werden (vgl. Prüser 2016, S. 67), erfolgt eine papiergebundene Weitergabe von Informationen derzeit häufig jedoch noch auf nicht dauerhaften Informationsträgern, z. B. auf Bauplänen (vgl. Helmus 2011, S. 60; Schorr & Klaubert 2011, S. 145; Gillies 2017, S. 18).

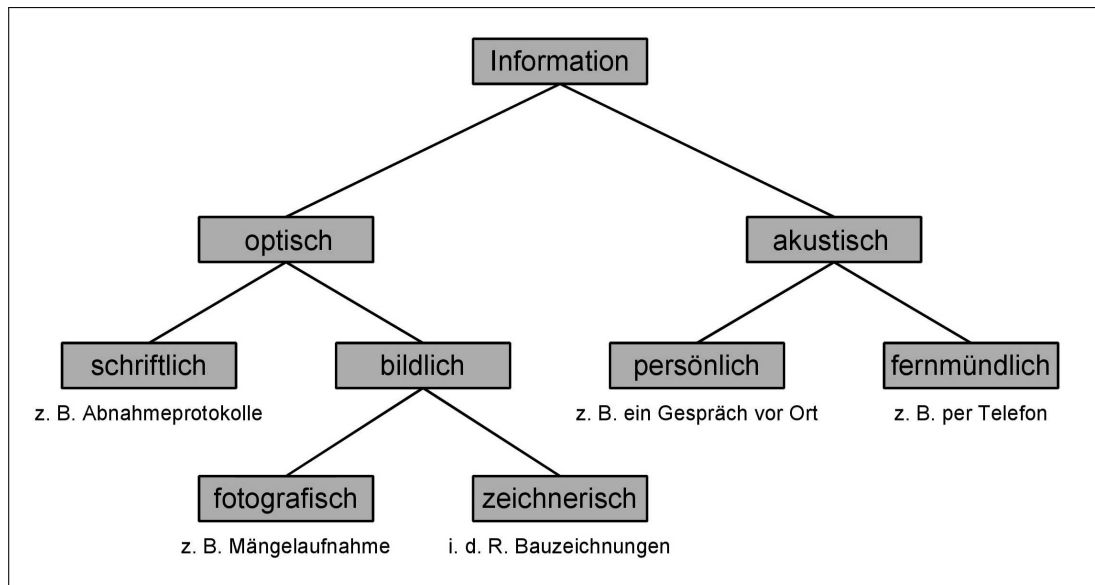


Abb. 4.1: Formen von Informationen im Bauwesen (eigene Darstellung in Anlehnung an Marx 2000, S. 15)

Eine Übermittlung bzw. ein Austausch entsprechender Dokumente findet dagegen heutzutage oft auf elektronischem Wege, i. d. R. per E-Mail, statt (vgl. Borrmann & Günthner 2011, S. 2). So wurde in Umfragen angegeben, dass das PDF-Format in vielen Bauunternehmen schon häufig zum Datenaustausch verwendet wird (vgl. Braun et al. 2015, S. 18; Koutsogiannis 2019, o. S.). Insbesondere bei großen unübersichtlichen Bauvorhaben kommt es jedoch wiederum häufig vor, dass auch über die in Abb. 4.1 dargestellte akustische Variante – z. B. während eines Gesprächs von Person zu Person direkt auf der

Baustelle oder fernmündlich per Telefon – kommuniziert werden muss, ohne dass dabei dokumentiert wird, welche Änderungen vorgenommen oder welche Inhalte besprochen wurden.

Auch wenn die Durchdringung mobiler Informationstechnologien auf Baustellen immer noch sehr schwach ist (vgl. Klemt-Albert et al. 2018, S. 191), findet auch im Bauhandwerk eine zunehmende Verwendung digitaler Arbeits- und Hilfsmittel zur Gewinnung und Vermittlung von Informationen statt (vgl. Rathswohl 2014, S. 103). So nutzen insbesondere kleine Bauunternehmen gängige Groupware-Systeme, wie z. B. Outlook, zwar noch eher rudimentär (vgl. ebd., S. 92), aber digitale Plattformen, wie bspw. Internet-Clouds, finden dennoch immer mehr Anwendung (vgl. van Renssen et al. 2016, S. 15). Dies ist mit zunehmender Informatisierung von enormer Bedeutung, da aufgrund der traditionellen und häufig trägen Übermittlungswege – bei denen viele Statusmeldungen an Baustellen stellenweise nur wöchentlich oder sogar nur monatlich stattfinden (vgl. Koutsogiannis 2019, o. S.) – projektspezifische Informationen häufig nur sehr langsam weitergeleitet werden. So ist zu berücksichtigen, dass die bereits heute über digitale Netzwerke vermittelten und stellenweise echtzeitnahen Austauschscenarien von Nachrichten und Dateien, auch zukünftig mithilfe zentraler BIM-Modelle zumindest täglich, wenn nicht sogar echtzeitnah, stattfinden werden (vgl. ebd.).³

Da papierbasierte Kommunikationsformen im Bauwesen heute noch die Regel darstellen, muss neben den stark zeitverzögerten Informationsweiterleitungen ebenfalls beachtet werden, dass mit entsprechenden analogen Datenweitergaben auch viele Informationen verloren gehen (vgl. Schorr & Klaubert 2011, S. 145). So finden bspw. Austauschscenarien bauwerksrelevanter Informationen i. d. R. nicht nur über eine einzige Stufe, z. B. zwischen Bauleiter/-innen und Polier/-innen statt, auch eine häufig auf Baustellen vorzufindende „Zettelwirtschaft“ (Helmus 2011, S. 60) verursacht im Rahmen von Bauprojektentwicklungen neben Informationsverlusten ebenfalls Fehleingaben, Übergangsfehler oder subjektive Interpretationen aufgrund falsch oder gar nicht vermittelter Informationen (vgl. Helmus 2009, S. 112; Borrmann & Günthner 2011, S. 2). Häufig werden entsprechende Informationsdefizite oder korrelierende Widersprüche aufgrund der verschiedenen Formen und Kommunikationsebenen im Bauwesen nur schwer und oftmals auch zu spät erkannt (vgl. Jehle et al. 2013, S. 23).

Betrachtet man den Lebenszyklus von Bauwerken als eine von Beginn an sukzessive Kumulation bauwerksrelevanter Daten, so ist jedoch ein kontinuierlicher und verlustfreier Prozess an Informationsweiterleitung von großer Wichtigkeit. Wie in Abb. 4.2 zu erkennen ist, werden mit zunehmendem Baufortschritt auch immer mehr Daten produziert.⁴ So ist es nicht nur aus Gründen einer optimalen Bauwerkserstellung überaus bedeutend, redundante und aktuelle Planungs- bzw. Ausführungsstände im Rahmen

³Im Rahmen der Methode BIM spricht man vom sog. *Common Data Environment*. Die damit verbundenen Aspekte werden in der vorliegenden Arbeit jedoch nicht weiter erläutert.

⁴Die Abbildung 4.2 stellt zur Verdeutlichung der Zunahme an Informationen lediglich eine grobe Näherung dar.

einer lückenlosen Informationsweitergabe nutzen zu können, sondern darüber hinaus auch alle relevanten Daten eines Bauvorhabens im Hinblick auf eine im Anschluss an die Fertigstellung nachvollziehbare Bauwerksdokumentation festzuhalten. Ein entsprechender durchgängiger und auch zeitnaher Informations- und Belegfluss – sowohl intern als auch extern – existiert jedoch bei vielen Unternehmen im Bauwesen nicht (vgl. Helmus 2011, S. 60). Und auch eine vollständige Informationsweitergabe im Rahmen von BIM – also von der Planung über die Baustelle bis hin zur Nutzung von Bauwerken – ist derzeit noch nicht, oder nur in kleinem Rahmen möglich (vgl. Gasteiger 2015, S. 35). Diesbezüglich besteht also großer Nachholbedarf bei der Umsetzung neuer Informationsmanagementprozesse in Planung und Ausführung (vgl. BMVBS 2013, S. 85).

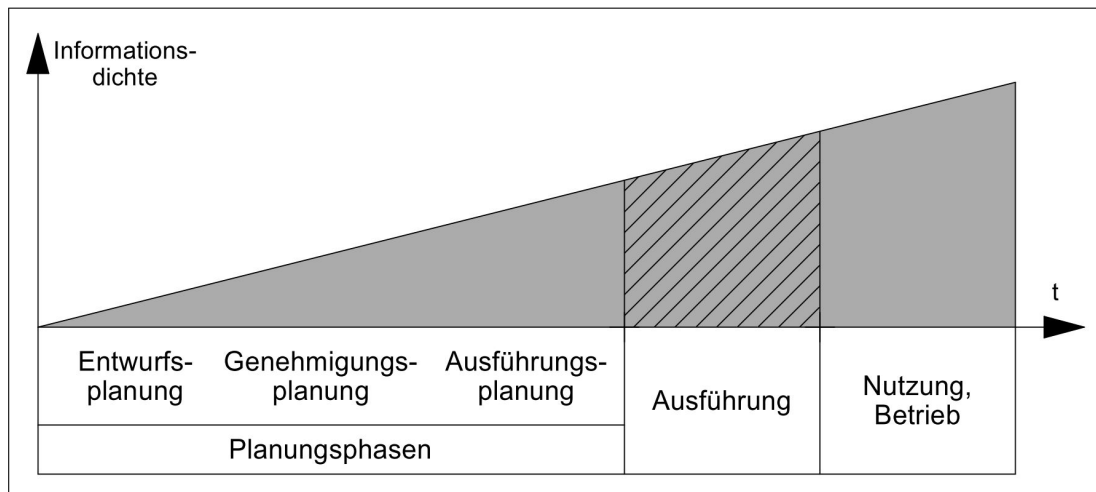


Abb. 4.2: Vereinfachte Darstellung der Zunahme an Informationen von der Idee bis zur Fertigstellung eines Bauwerks (eigene Darstellung)

Neben dem Problem der Aufrechterhaltung einer stetigen Informationsweitergabe muss ein weiteres – nicht nur für das Bauwesen relevantes – Phänomen im Zuge der Digitalisierung berücksichtigt werden. Durch die stetige Zunahme der ohnehin schon stellenweise mannigfaltigen Daten und Informationen besteht bspw. insbesondere auf Seiten von BIM-Nutzerinnen und BIM-Nutzern die Gefahr einer Informationsüberflutung. In einem Forschungsbericht des *Bundesministeriums für Arbeit und Soziales* zur Digitalisierung am Arbeitsplatz aus dem Jahr 2015 gaben 36 % aller Beschäftigten an, dass bei ihrer Arbeit mit modernen Kommunikationsmitteln, wie E-Mail, Smartphone und Internet, eine schwer zu bewältigende Menge an Informationen entsteht (vgl. Arnold et al. 2015, S. 14). Betrachtet man diese Folgen differenziert nach Qualifikationsniveaus, so zeigt sich zudem, dass durch die Nutzung moderner Informations- und Kommunikationstechnologien höher Qualifizierte öfter eine digitale Informationsflut wahrnehmen als niedriger qualifizierte Beschäftigte. In Abb. 4.3 ist diesbezüglich zu erkennen, dass der Anteil der Beschäftigten mit einem niedrigen Ausbildungsniveau, die über eine Informationsflut klagen, gerade mal bei 25 % liegt.

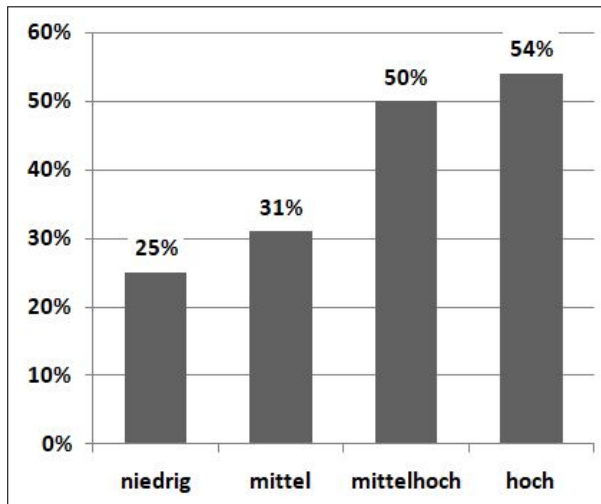


Abb. 4.3: Eindruck einer Informationsflut nach Ausbildungsniveau (eigene Darstellung nach Arnold et al. 2015, S. 16)

Unabhängig jedoch davon, welches Bildungsniveau die im Forschungsvorhaben betrachteten Baufacharbeiterinnen und Baufacharbeiter aufweisen, muss – wie zuvor in Abschnitt 2.2 bereits dargestellt – stark davon ausgegangen werden, dass eine Zunahme an Informationen für alle vier dargestellten Kategorien auch im Bauwesen zu berücksichtigen ist. Dieser Zuwachs an digitalen Angaben und die damit verbundenen komplexen Verzweigungen von Wissen, sowie die Tatsache, dass Menschen nur einen Bruchteil der auf sie einwirkenden Daten aufnehmen können, sind Ursachen für eine entsprechende – häufig intersubjektiv übertragbare – Informationsflut (vgl. Dick & Wehner 2006, S. 455; Hartmann 2015, S. 51). Hinzu kommt,

dass Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern – v. a. in kleinen und mittelständischen Unternehmen – oft ein Verständnis für die Notwendigkeit einer Organisationsstruktur fehlt, die eine entsprechende Flut eindämmen könnte (vgl. Berbig et al. 2003, S. 4). Da also nicht nur das Daten- und Informationsmanagement im Rahmen von BIM, sondern darüber hinaus auch die möglichen zugehörigen Prozesse auf Grundlage von Auto-ID-Techniken – z. B. in Form von RFID – in Zukunft eine immer größere Rolle spielen werden (vgl. Helmus 2009, S. 495; Borrmann & Günthner 2011, S. 2; BMVBS 2013, S. 40; Kölzer & Ranke 2014, S. 30; Planen Bauen 4.0 2015a, S. 35-36; Gasteiger 2015, S. 124; Hausknecht & Liebich 2016, S. 34 und S. 171; Prüser 2016, S. 67), muss den damit verbundenen organisatorischen Aspekten im Hinblick auf zukünftige Baustellenarbeitsprozesse – auch über die hier nur kurz aufgezeigten Probleme hinaus – ein besonderes Augenmerk gewidmet werden. Im Rahmen entsprechender Analysen sind v. a. auch kleine und mittelständische Unternehmen zu berücksichtigen (vgl. Boes et al. 2014, S. 8; Rathswohl 2014, S. 21 und S. 30-31).

Wissensmanagement im Rahmen von Baustellenvorgängen

Der zuvor bereits erläuterte Begriff der Informatisierung kann, wie in Abb. 4.4 zu erkennen, auch als Zusammenspiel zwischen *Daten*, *Informationen* und *Wissen* aufgefasst werden (vgl. Dick & Wehner 2006, S. 455; Wiegerling 2015, S. 305). Die drei in diesem Zusammenhang auftretenden Komponenten sind durch ihre Zwischenbezüge auch als *Wissensmanagement* auffassbar (vgl. ebd.). Im Vergleich zu der bereits erwähnten Entwicklung der Informatisierung in den 1950er Jahren, handelt es sich beim Wissensmanagement jedoch um eine noch relativ junge Disziplin (vgl. Rathswohl 2014, S. 30).

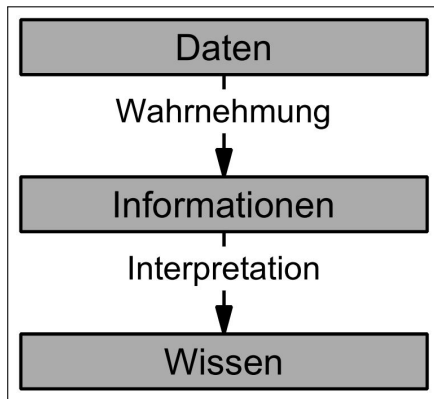


Abb. 4.4: Wissensmanagement
(eigene Darstellung)

Neben den drei in Abb. 4.4 dargestellten Komponenten Daten, Information und Wissen, kann im Hinblick auf das Wissensmanagement auch der Zusammenhang und das Verwalten von Handlungen und Kommunikation mit einbezogen werden (vgl. Dick & Wehner 2006, S. 455; Rathswohl 2014, S. 31; Hartmann 2015, S. 47-48; S. 70; Gensicke et al. 2016, S. 34). Beim Wissensmanagement handelt es sich übergeordnet um eine kontinuierliche Analyse, bei der Wissen erworben, bewertet, genutzt, weiterentwickelt und angewendet wird (vgl. Rathswohl 2014, S. 30 und S. 49; Hartmann 2015, S. S. 69 und S. 71). Man spricht dabei auch von einem bewussten, strukturierten, systematischen und reflektierten Umgang mit Wissen (vgl. Dick & Wehner

2006, S. 455; Rathswohl 2014, S. 30; Hartmann 2015, S. 71; Winkelhake 2017, S. 216). Ziel des Wissensmanagements ist es Produkte, Prozesse und Geschäftsfelder im Rahmen stetiger Weiterentwicklungen von Organisationen zu gestalten und zu verbessern (vgl. Dick & Wehner 2006, S. 454; Rathswohl 2014, S. 31). So kann bspw. eine entsprechend gut geplante „Wissensversorgung einer Organisation“ (Hartmann 2015, S. 71) einer Bewältigung der zuvor bereits erwähnten Informationsflut entgegenwirken (vgl. Dick & Wehner 2006, S. 459). Die drei Gestaltungsfelder Technik, Organisation und Mensch bilden dabei jeweils eine tragende Säule des Wissensmanagements (vgl. Rathswohl 2014, S. 32). Sie werden aufgrund ihrer Relevanz für das vorliegende Forschungsvorhaben und im Hinblick auf die Analyse kleiner und mittelständischer Bauunternehmen nachfolgend noch genauer erläutert. Zuvor sind jedoch die drei in Abb. 4.4 dargestellten Begriffe Daten, Informationen und Wissen für ein nachvollziehbareres Verständnis des Wissensmanagements voneinander abgrenzend zu beschreiben (vgl. Dick & Wehner 2006, S. 455; Rathswohl 2014, S. 19).

Im Rahmen einer Begriffshierarchie befindet sich auf der ersten Ebene ein Vorrat an verschiedenen Zeichen, bei denen es sich bspw. um Zahlen, Texte, Bilder, aber auch um Größen oder Farben handeln kann (vgl. Dick & Wehner 2006, S. 455; Porschen 2008, S. 36; Rathswohl 2014, S. 20). Ein wesentliches Merkmal von Daten ist eine mit diesen Klassifizierungen einhergehende Unterscheidung (vgl. Dick & Wehner 2006, S. 455), bei der die einzelnen Zeichen aufgrund potenzieller Zustandsänderungen nicht per se konstant sein müssen (vgl. Hartmann 2015, S. 47 und S. 51). Losgelöst von jedem Kontext stellen Daten dabei jedoch noch keine Informationen dar, da sie ohne relevante Bezüge semantisch noch nicht wahrgenommen werden (vgl. Wiegerling 2015, S. 305). Erst durch Aufnehmen und Verarbeiten im Rahmen kognitiver Prozesse erhalten ihre formalisierten Darstellungen einen Wert (vgl. Hartmann 2015, S. 52; VDI 2552-2 2018, S. 5). Eine Anreicherung von Daten mit zusätzlichem Kontext verschafft den Daten also Bedeutung, so dass aus Zeichen Information werden (vgl. Dick & Wehner 2006, S. 455). Diese sind dann i. d. R. systemisch relevant, d. h. sie erhalten durch ihre semantische

Wahrnehmung im Verhältnis zu anderen Organismen oder Elementen eine kontextbezogene Bedeutung (vgl. Dick & Wehner 2006, S. 455; Porschen 2008, S. 36; Wiegerling 2015, S. 305; Rathswohl 2014, S. 20; Hartmann 2015, S. 48 und S. 50). Leitet man darüber hinaus Daten wieder aus einer Wissensstruktur ab, so werden sie ebenfalls in Informationen transformiert, die dann einem anderen Organismus zur Verfügung stehen können (vgl. Hartmann 2015, S. 53). Durch die untereinander in Beziehung stehenden Wissens- und Organisationsstrukturen werden – da auch hier der Austausch von Daten über eine gemeinsame Basis bzw. mithilfe eines *Transformationsmittels* stattfindet – Gemeinsamkeiten mit der Methode BIM durchaus ersichtlich.

Eine persönliche Bewertung und Vernetzung von Zeichen, Daten und Informationen – bestenfalls kombiniert mit einer abgeschlossenen Berufsausbildung oder beruflichen Erfahrungen – schafft im Anschluss an die Aufnahme von Daten und der damit verbundenen Wahrnehmung das eigentliche, meist personengebundene Wissen (vgl. Dick & Wehner 2006, S. 456; Porschen 2008, S. 36; Rathswohl 2014, S. 20). Dieses Wissen geht durch ein Vergleichen, ein Bewerten oder ein Konsequenzen-Ziehen in einem kontinuierlich fortlaufenden, sich wiederholenden und kontextbezogenen Prozess über die zuvor verortete reine Informationsverknüpfung hinaus (vgl. Dick & Wehner 2006, S. 456; Rathswohl 2014, S. 20; Wiegerling 2015, S. 305). Es finden stets Verwertungs- und Strukturierungsvorgänge statt, bei denen die vorangegangenen Interpretationen hierarchisch und im Hinblick auf sinnvolle Zusammenhänge oder eine kontextbezogene Nutzung analysiert werden (vgl. Schilcher & Diekmann 2014, S. 8; Hartmann 2015, S. 47 und S. 51). Dieses Wissen ist somit bspw. für flexible Arbeitshandlungen oder Veränderungen in Organisationsstrukturen – wie nachfolgend noch gezeigt wird – von großer Bedeutung (vgl. Schilcher & Diekmann 2014, S. 20). Durch die Vernetzung von Informationen ist Wissen somit aus den beiden vorangestellten Wissensmanagement-Elementen Daten und Informationen heraus, insbesondere durch Kombination und Analyse zu gewinnen (vgl. Dick & Wehner 2006, S. 455).⁵ Da Informatisierung und Wissensorientierung eng aufeinander bezogene Prozesse darstellen, und ebenfalls neue Wissensprozesse notwendig machen (vgl. Schilcher & Diekmann 2014, S. 21), sind die hier angerissenen Aspekte auch im Hinblick auf notwendige Qualifikationen für das Baustellenpersonal von großer Bedeutung.

Da das Wissen von Facharbeiterinnen und Facharbeitern nicht nur Einfluss auf die eigentlichen Arbeitsprozesse vor Ort, sondern auch auf die Vorgänge im jeweiligen Bauunternehmen ausübt, ist es gerade für kleine und mittelständische Betriebe im Hinblick auf deren wirtschaftlichen Aspekte überaus wichtig, dieses Wissen zu nutzen (vgl. Rathswohl 2014, S. 30). Im Rahmen des Wissensmanagements können die drei zuvor genannten Gestaltungsfelder *Technik*, *Organisation* und *Mensch* als tragende und relevante Säulen für betriebliche Strukturen angesehen werden (vgl. Rathswohl 2014, S. 32; siehe dazu

⁵Das ein Zuwachs und die Verzweigung von Wissen sowie die Möglichkeiten seiner Darstellung und Verbreitung auch Ursachen für die zuvor genannte Informationsflut sein können bzw. dass Informationen und Daten nicht nur Voraussetzung für Wissen, sondern auch dessen Resultat darstellen (vgl. Dick & Wehner 2006, S. 455), wird im Rahmen des Forschungsvorhabens nicht weiter verfolgt.

auch Abb. 4.6). Abbildung 4.5 zeigt die Veränderung der Wichtigkeit der einzelnen Gestaltungsfelder getrennt nach den zuvor genannten Stufen Daten, Informationen und Wissen sowie zusätzlich nach Kompetenzen.

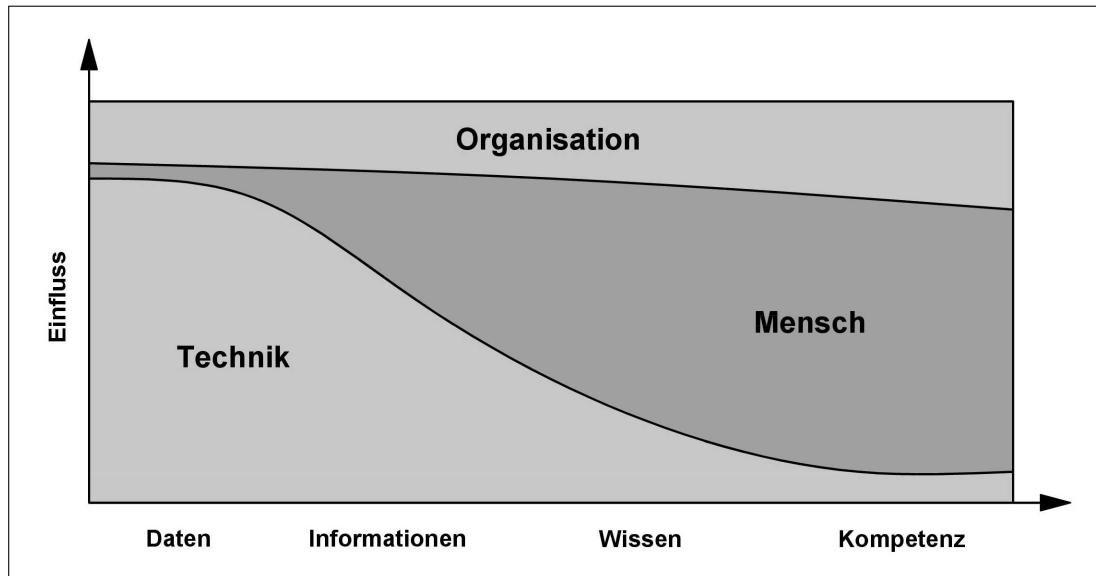


Abb. 4.5: Veränderung der Relevanz der Wissensmanagement-Gestaltungsfelder (eigene Darstellung nach Rathswohl 2014, S. 34)

Je höher die Wissensstufe ist, desto relevanter wird der Faktor Mensch, da das Wissen, das Können und die Fertigkeiten stark personenabhängig sind (vgl. Rathswohl 2014, S. 34). Dies kann aufgrund der aufgezeigten Besonderheiten im Bauwesen mit den bereits gewonnenen Erkenntnissen aus Abschnitt 3.2 zur Ausführung routinierter Tätigkeiten verglichen werden. Wie in Abb. 4.5 zu erkennen ist, spielt die Technik – im Rahmen der Digitalisierung z. B. in Form von Augmented Reality oder Baurobotern – eine eher untergeordnete Rolle. Aber gerade im Hinblick auf das dritte Gestaltungsfeld, die Organisation, und der bereits zuvor dargestellten Zunahme an Informatisierungsprozessen, sind Technologien schon heute und – wie in Abschnitt 2.2 dargestellt – in Zukunft von immer größerer Bedeutung. So sollten innovative Entwicklungen nicht nur auf das Speichern oder Ablegen von Daten und Informationen reduziert werden (vgl. ebd.), sondern v. a. auch im Hinblick auf die zuvor aufgeführten zunehmenden Mensch-Maschine-Interaktionen als Informations- und Kommunikationsmittel wahrgenommen und berücksichtigt werden (vgl. Rammert 2016, S. 8-9). Die Technik, die im Wissensmanagement bisher eine eher unterstützende Funktion besaß (vgl. Rathswohl 2014, S. 32), sollte somit im Rahmen der Digitalisierung, und insbesondere mit Fokus auf Informatisierung und Kommunikation in entsprechende Untersuchungen mit einbezogen werden. Da v. a. die Faktoren Mensch und Organisation einen strukturierten und kontinuierlichen Wissensfluss innerhalb von Unternehmen gewährleisten (vgl. ebd.), sind

sie im Rahmen des Wissensmanagements und somit auch in innerbetriebliche Vorgänge und Arbeitsstrukturen bestenfalls übergeordnet einzubinden (vgl. Dick & Wehner 2006, S. 455). Es kann somit festgehalten werden, dass notwendiges prozessrelevantes Wissen nicht nur in Bezug auf die abzuwickelnden außerbetrieblichen Bauprojekte relevant wird, sondern, dass es auch innerhalb von Bauunternehmen – auch im Hinblick auf die zunehmende Verwendung digitaler Bauwerksinformationsmodelle – stets berücksichtigt werden sollte.

Informationsaustauschprozesse im Rahmen von BIM

Das methodische Vorgehen, so wie es im Rahmen von BIM gedacht ist, stellt weitestgehend bereits bekannte Konzepte bzw. Interaktionsformen dar. So handelt es sich bei einer vereinfachten Betrachtung der noch jungen Methode grundlegend um bipolare Beziehungen zwischen Sendern und Empfängern.⁶ Ein entsprechendes Schema beinhaltet vordergründig eine Partei, die Daten aufbereitet und eine Partei, die diese Informationen verwertet (vgl. Hartmann 2015, S. 53). Auch die zuvor thematisierten Gestaltungsfelder des Wissensmanagements, *Technik*, *Organisation* und *Mensch*, decken sich fast vollständig mit den Zielen der Methode BIM. So werden in einer Richtlinie des VDI die Faktoren *Mensch*, *Technologie*, *Prozesse* und *Rahmenbedingungen* aufgeführt (vgl. VDI 2017, S. 6). Insbesondere die Prozesse spielen dabei im Rahmen von BIM eine wesentliche Rolle, da sie nicht nur die darin stattfindenden Tätigkeiten beschreiben, sondern ebenfalls die Datenaustausch-Szenarien mit einem oder mehreren Prozessbeteiligten definieren (vgl. VDI 2552-7 2018, S. 4). Zu berücksichtigen ist dabei stets, dass die zu tauschenden Informationen aktuell, vollständig und valide sind und darüber hinaus zeitnah zur Verfügung stehen (vgl. ebd.).

Abb. 4.6 zeigt im rechten Bereich schematisch den Prozess einer Wissensvermittlung innerhalb von BIM. Neben den Sendern, die im Rahmen von BIM als Autor/-innen verstanden werden können, sind es die Empfänger – im vorliegenden Fall durch die Baufachkräfte bzw. BIM-Nutzer/-innen repräsentiert –, die als Akteur/-innen im Rahmen der neuen Methode miteinander interagieren. Bei einem entsprechenden einfachen *Sender-Speicher-Empfänger-Schema* (vgl. Hartmann 2015, S. 54), dessen Kern ein zentrales Bauwerksinformationsmodell darstellt, wird durch mögliche Zwischenspeicherung von Informationen nicht nur eine effektive, sondern v. a. auch eine substanzielle, weil nachweislich prüfbare Kommunikationsform ermöglicht. Da die übermittelten Daten jedoch nur dann verstanden werden können, wenn Sender und Empfänger einen gemeinsamen Kontext besitzen, d. h. wenn sie die gleiche Sprache sprechen (vgl. ebd.), ist im Hinblick auf zukünftige Bauwerkserstellungen ein auf intersubjektiven Prinzipien beruhendes Austauschkonzept von übergeordneter Bedeutung. Nicht nur dass sich – wie in Abschnitt 3.1.1 gezeigt – das Fachvokabular im Rahmen von BIM ändert, auch die Tatsache, dass Informationen ausgelesen werden müssen, stellt Beteiligte zukünftig vermehrt vor prozessbedingte Herausforderungen.

⁶Bei der Methode BIM handelt es sich gerade nicht um bipolare Beziehungen. Für das Aufzeigen relevanter Zusammenhänge sind hier jedoch nur zwei Parteien, Sender und Empfänger, genannt.

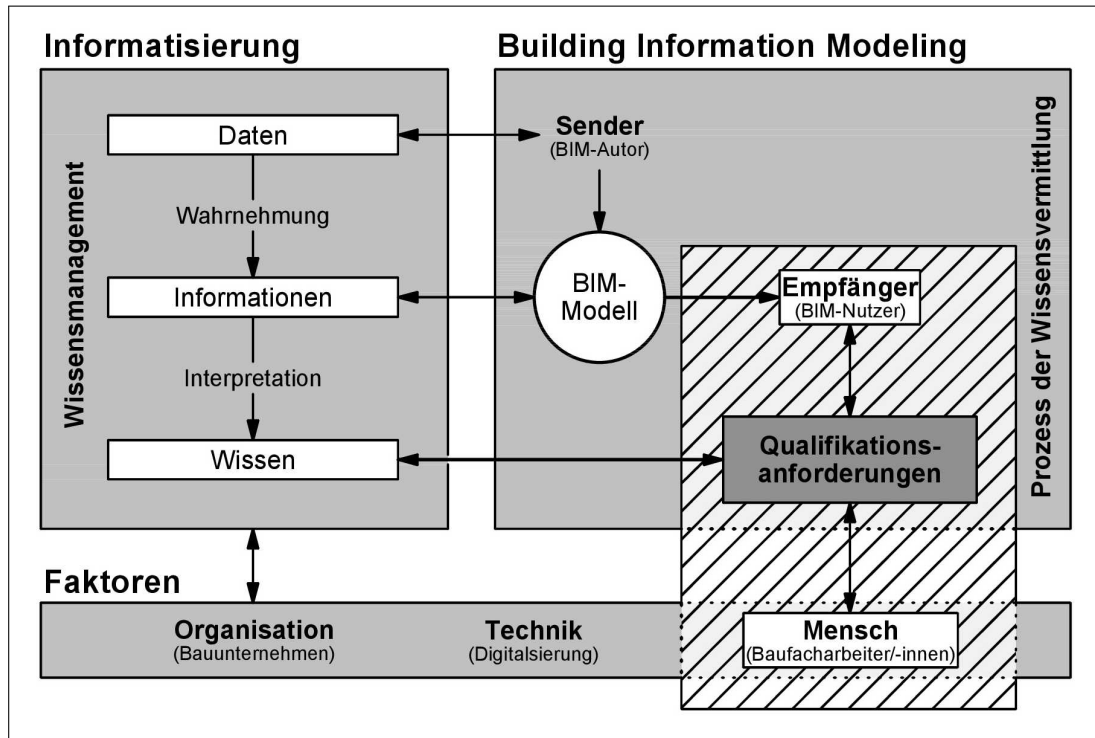


Abb. 4.6: Wissensmanagement und Building Information Modeling (eigene Darstellung)

Das bereits zuvor erwähnte Datenformat *Industry Foundation Classes (IFC)* dient dabei zwar als übergeordnete konzeptionelle Lösung, ohne entsprechende Kenntnisse können Akteurinnen und Akteure innerhalb von BIM dieses Austauschformat jedoch nur eingeschränkt oder im schlechtesten Fall gar nicht nutzen. Um die Informationen, die für die Errichtung eines Bauwerks notwendig sind, aus einem BIM-Modell auslesen zu können, müssen die Empfänger in der Lage sein, die in dem zentralen dreidimensionalen Modell verorteten Angaben nicht nur ausfindig zu machen, sondern diese auch sinnvoll zu verwenden (vgl. Hartmann 2015, S. 54).

Damit entsprechende Prozesse zukünftig auf Baustellen durchgeführt werden können, ist es wichtig die dafür notwendigen Kenntnisse in Ausbildungen von Baufachkräften zu berücksichtigen, um diese den angehenden BIM-Nutzerinnen und Nutzern im Hinblick auf prozessoptimierte und wirtschaftliche Bauwerkserstellungen frühzeitig zu vermitteln. Zu den damit einhergehenden notwendigen Qualifikationen zählt ebenfalls, dass Facharbeiterinnen und Facharbeiter auf Baustellen – wie in Abschnitt 3.1.1 gezeigt – auch in der Lage sein müssen, Informationen in existierende Modelle einzuspeisen. Dafür ist es wiederum wichtig, die dafür notwendigen Konventionen und Vorgehensweisen zu kennen. Dies kann bspw. das Einhalten bestimmter Reihenfolgen oder die allgemeine Nutzung des hier angesprochenen Austauschformats IFC beinhalten (vgl. ebd.).

Berücksichtigt man alle wesentlichen Qualifikationsanforderungen, die im Rahmen von BIM notwendig sind, so können, wie in Abb. 4.6 dargestellt, neben den eigentlichen praxisrelevanten Aspekten auf Baustellen, auch das zuvor angesprochene Gestaltungsfeld *Mensch*, sowie Aspekte des Wissensmanagements abgedeckt werden. Für verlustfreie Informationsweiterleitungen bzw. für eine konsequente und durchgehende Nutzung digitaler Informationen, ist es im Rahmen von BIM nicht nur sinnvoll, dass die unterschiedlichen Gewerke auf der Baustelle vor Ort jederzeit auf das aktuellste Bauwerksmodell zugreifen und die für sie relevanten Informationen einsehen können (vgl. Borrmann et al. 2015, S. 3; Bernert 2016, S. 35), sondern auch das die dargestellten Zusammenhänge zwischen Senden und Empfangen verstanden werden, damit im Falle auftretender Schwierigkeiten entsprechende Kenntnisse zur Lösung prozessbedingter Probleme herangezogen werden. Dabei sind wiederum stets die drei Gestaltungsfelder Organisation, Technik und Mensch im Hinblick auf eine wirtschaftliche Projektabwicklung einzubeziehen (s. Abb. 4.6). Hierbei ist es – wie zuvor bereits erläutert – insbesondere der Faktor Mensch, der durch seine Qualifikationen bzw. sein umfangreiches Wissen essenziell an den mannigfaltigen Bauabläufen beteiligt ist.

Ohne ein Verständnis für Informatisierungsprozesse bzw. für das Wissensmanagement eines Unternehmens im digitalen Zeitalter, besteht darüber hinaus die Gefahr einer lückenhaften Projektabwicklung, was wiederum nicht nur dem Ziel der Methode BIM entgegensteht (vgl. Abschnitt 2.3), sondern ebenfalls Baubetriebe daran hindert sich an zukünftigen Bauprojekten zu beteiligen. Die hier dargestellten Zusammenhänge zwischen Wissensmanagement und BIM werden auch in den Richtlinien des *Vereins Deutscher Ingenieure (VDI)* zur Implementierung von Building Information Modeling in Unternehmen genannt (vgl. VDI 2552-8 2019, S. 7). Die in diesem Dokument aufgeführten notwendigen Qualifikationen für die Anwendung der Methode BIM verorten somit die hier thematisierten Zusammenhänge auf einer zukunftsorientierten und normativ verankerten Ebene.

Informatisierung in kleinen und mittelständischen Bauunternehmen

Bevor im letzten Segment des vorliegenden Abschnitts auf die Notwendigkeit der hier dargestellten Inhalte und den daraus entstehenden möglichen Qualifikationsanforderungen von Baufacharbeiterinnen und Baufacharbeitern eingegangen wird, sind zuvor relevante Aspekte aufgeführt, die eine Berücksichtigung der Informatisierung bzw. des Wissensmanagements v. a. für kleine und mittelständische Unternehmen stützen. Ausgehend von der bereits in Abschnitt 3.1.2 dargestellten und in Zukunft immer stärker in Erscheinung tretenden Vorteile einer zeitnahen Informationsbereitstellung auf Grundlage eines dreidimensionalen Bauwerksmodells, stellen sich die damit einhergehenden positiven Aspekte nicht nur für große Baufirmen ein (vgl. Schreyer 2016, S. 51). So wird bspw. neben dem Eingeben von Informationen hinsichtlich einer konsistenten Baufortschrittsdokumentation auch das Verwalten von Kleingeräten für Bauunternehmen – unabhängig von der Betriebsgröße – immer relevanter (vgl. Helmus 2011, S. 106; Gasteiger 2015, S. 124).

Bereits im traditionell-existierenden Bauwesen ist in den verschiedenen Formen von Bauunternehmen der Umgang mit Informationen und Erfahrungen sehr unterschiedlich (vgl. Rathswohl 2014, S. 114). Durch die Verortung eines Handwerksbetriebs bzgl. Tätigkeitsfeld, eigener Erfahrungswerte und daraus abgeleiteten Betrachtungsweisen, ergeben sich auch unterschiedliche Konzepte des Wissensmanagements. Viele kleine und mittelständische Bauunternehmen besitzen zwar ein Bewusstsein für die Wichtigkeit der Ressource Wissen und der zumindest unternehmensweit vorhandenen Informationen und Erfahrungen, aber nur wenige haben ein strategisch ausgerichtetes – häufig sogar ein unstrukturiertes bzw. unsystematisches – Wissensmanagement in ihrer Unternehmensstruktur implementiert (vgl. Kölzer & Ranke 2014, S. 38; Rathswohl 2014, S. 114, S. 116 und S. 194). Findet ein Einsatz von Informationssystemen statt, so handelt es sich i. d. R. um internetbasierte Tätigkeiten (vgl. Rathswohl 2014, S. 107), die sich jedoch in den meisten Fällen auf oberflächliche Produkt-Recherchen oder projektbezogene Kontaktdaten-Suchen beschränken.

Die Notwendigkeit von Facharbeiterwissen in Informatisierungsprozessen

Nach dem vorangegangenen Aufzeigen der Zusammenhänge zwischen Informatisierung, Wissensmanagement und BIM stellt sich die Frage, welche zusätzlichen Kompetenzen sich die Beteiligten aneignen müssen, um bspw. digitale Bauwerksinformationsmodelle in der Phase der Bauausführung nutzen zu können (vgl. Gasteiger 2015, S. 124). Wie im vorliegenden Abschnitt dargelegt bedürfen informatisierte Sachverhalte immer wieder der Rückübersetzung in Kontexte (vgl. Schilcher & Diekmann 2014, S. 8), was zu der Annahme führt, dass ein Vermitteln reiner bautechnischer Fachkenntnisse in Zukunft nicht mehr ausreicht, um Fachkräfte auf die anstehenden Aufgaben vorzubereiten.

Es ist somit sicherzustellen, dass zukünftig nicht nur rein technische, sondern ebenfalls informations- und prozessrelevante Inhalte berücksichtigt werden. Ein damit einhergehender aktiver Einsatz menschlicher Subjektivität und eines in der Person verkörpertem Wissen, ist dabei stets zu berücksichtigen (vgl. ebd.). Betrachtet man diesbezüglich verschiedene Aspekte subjektiven Wissens, so können übergeordnet zwei Kategorien festgehalten werden, die im Rahmen einer wissensorientierten Unternehmensführung von Bedeutung sind: das *kognitive Informationswissen* und das *operative Handlungswissen* (vgl. Rathswohl 2014, S. 21). Abbildung 4.7 zeigt Zusammenhänge, die sich auch im Hinblick auf die Methode BIM ergeben. Je nach Tätigkeit einer Person stehen eher die kognitiven oder eher die operativen Aspekte im Vordergrund (vgl. ebd.). Beim kognitiven Wissen handelt es sich um jenes Wissen, welches durch bewusste Denkprozesse dokumentierbar ist oder in Worte gefasst werden kann. Das operative Handlungswissen hingegen ist lediglich demonstrier-, aber nicht artikulierbar. Da aber erst durch Artikulationen facharbeitsrelevantes Kompetenz- und Fertigkeitwissen vermittelt werden kann, sind übergeordnet – unabhängig davon, welche der beiden Kategorien betrachtet wird – stets Aspekte der Reflexion und der Kommunikation zu berücksichtigen (vgl. ebd.).

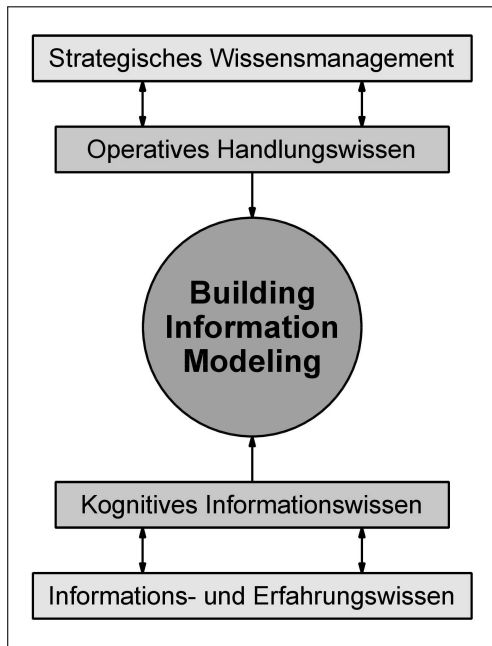


Abb. 4.7: Kategorien des Wissensmanagements in Bezug auf BIM (eigene Darstellung in Anlehnung an Rathswohl 2014, S. 22)

Es wird deutlich, dass nicht nur aufgrund der Allgegenwart von Informationen und Daten sowie der damit verbundenen Integration verschiedener neuer Prozesse, Facharbeiter zukünftig ohne Wissen und Verständnis über ihre Organisation, über die darin ablaufenden Prozesse, sowie über die verwendeten Technologien nicht auskommen werden (vgl. Scheer & Wacher 2018, S. 86). Da das damit verbundene Managen von Wissen kein einmaliger, sondern ein kontinuierlicher Prozess ist, der eine Aufklärung und eine Motivation der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter voraussetzt, müssen Wissensverteilungen organisiert bzw. umgesetzt und weitergegeben werden (vgl. Rathswohl 2014, S. 32 und S. 49). Dies gilt insbesondere für kleine und mittelständische Bauunternehmen, da diese stets praxisorientiert ausgerichtet sind (vgl. Rathswohl 2014, S. 21). Im Hinblick auf zukünftige Qualifikationen von Baufacharbeiterinnen und Baufacharbeitern bleibt also festzuhalten, dass Informatisierung stets mit höheren Notwendigkeiten von Wissen einhergeht (vgl. Kölzer & Ranke 2014, S. 40; Schilcher & Diekmann 2014, S. 2 und S. 20-23).

Für weitere Betrachtungen ist somit zu berücksichtigen, dass Informationstechnologien nicht nur abstrakte, quasi über den Köpfen der Menschen schwebende Phänomene darstellen (vgl. Schilcher & Diekmann 2014, S. 20), sondern dass sie in sozialen Zusammenhängen strukturiert und kontextualisiert werden müssen (vgl. ebd.). Die Fähigkeiten von Facharbeiterinnen und Facharbeitern sind mithilfe dieser Erkenntnisse bestenfalls zu informationellen Selbstbestimmungen ausbauen (vgl. Kölzer & Ranke 2014, S. 43; Rathswohl 2014, S. 32). Im beruflichen Kontext wird in Zukunft daher weniger die Frage wichtig sein, welche Qualifikation für eine bestimmte Tätigkeit erforderlich ist, sondern vielmehr, welche Aufgaben im Rahmen der hier dargestellten Informatisierungsprozesse von Menschen mit bestimmten Kompetenzen bewältigt werden können (vgl. Apel & Apt 2017, S. 71; Wischmann & Hartmann 2018, S. 1). Es zeigt sich im Hinblick auf das Wissensmanagement in Unternehmen, dass die hier behandelten Aspekte immer zentraler für berufliche Qualifikationen werden (vgl. Krings & Fiedeler 2005, S. 120). So ist zusammenfassend festzuhalten, dass nicht nur das Erzeugen, Speichern und Verteilen von Informationen zukünftig eine wesentliche Rolle spielen wird, sondern dass auch das Anwenden bzw. Nutzen der zur Verfügung gestellten Daten prozessbasiertes Wissen im Rahmen eines digitalen Wissensmanagements erfordert (vgl. Dick & Wehner 2006, S. 459).

Auch die bereits zuvor erwähnten Phänomene zunehmender Interaktionen innerhalb verschiedener Projektphasen und die damit einhergehenden möglichen Informationsüberflutungen durch zur Verfügung gestellte Daten, begründen im Hinblick auf Qualifikationsanforderungen verstärkt weitere Untersuchungen (vgl. Krings & Fiedeler 2005, S. 120; Glock 2018, S. 620; VDI 2552-2 2018, S. 5). Darüber hinaus sei an dieser Stelle die im Rahmen von BIM geforderte lückenlose Informationsweitergabe nochmals erwähnt. Abb. 4.8 zeigt, wie während der Abwicklung eines Bauvorhabens bei traditionellen Vorgängen wertvolle Informationen an verschiedenen Stellen, z. B. durch veraltete Baupläne oder nur eingeschränkt weiterverwendbare Digitalformate, verloren gehen (vgl. Borrmann et al. 2015, S. 2; Baier & Díaz 2017, S. 33-34). Diese Verluste können durch die Nutzung eines zentralen und dreidimensionalen Informationsmodells und im Hinblick auf eine damit einhergehende wirtschaftlichere Bauwerkserstellung erheblich verringert werden.

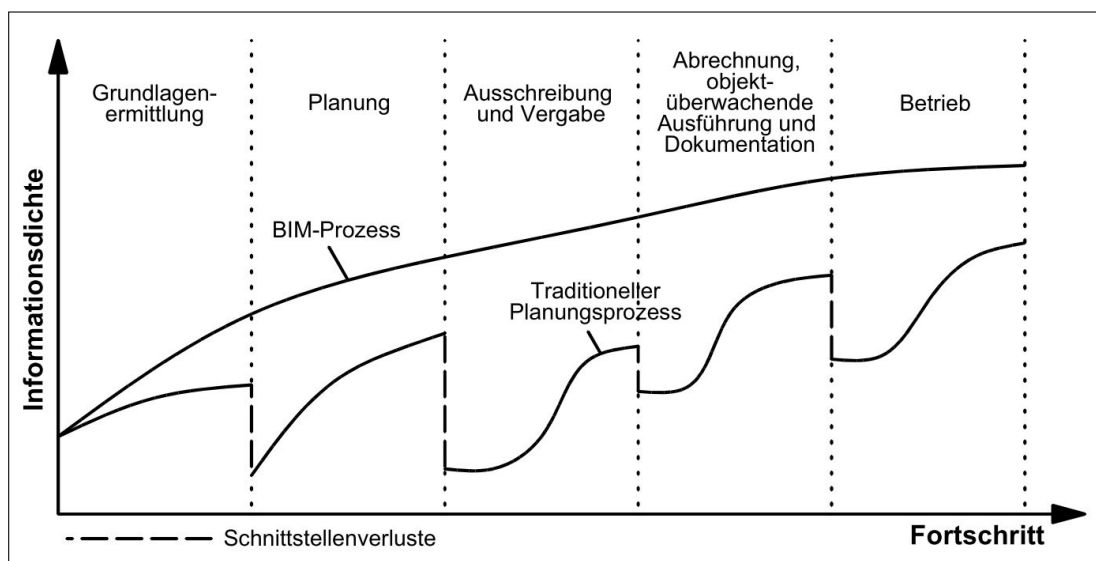


Abb. 4.8: Gegenüberstellung traditioneller und BIM-basierter Informationsdichten (eigene Darstellung nach Baier & Díaz 2017, S. 34)

Die in diesem Abschnitt gewonnenen Erkenntnisse bilden zusammen mit den nachfolgenden Aspekten zu Kommunikationsvorgängen auf Baustellen wesentliche Grundlagen für die in Kapitel 5 verortete Online-Umfrage.

4.2 Kommunikationsvorgänge auf Baustellen

Im vorliegenden Abschnitt wird anknüpfend an die zuvor behandelten Informatisierungsprozesse dargestellt, dass für eine Kombination der ohnehin schon schwierigen Bedingungen auf Baustellen (s. Abschnitt 3.4) mit den zunehmenden digitalen Kommunikationsformen gesonderte Untersuchungen – insbesondere im Hinblick auf die anstehenden Änderungen infolge BIM – notwendig sind. Ergänzend zu den behandelten Aspekten der Informatisierung – bei der die Datenaustausch-Szenarien im Vordergrund standen – wird nachfolgend die menschliche Interaktion auf Baustellen in den Fokus gerückt. Bevor dabei explizit auf traditionelle Kommunikationsvorgänge vor Ort eingegangen wird, ist einleitend dargestellt, welche allgemeinen bzw. übergeordneten Arten der Kommunikation existieren. Dass insbesondere bei der Herstellung von Unikaten branchenspezifische Formen von Kommunikation vorzufinden sind, wird daran anschließend mit Bezug zu den bereits genannten Besonderheiten thematisiert. Bevor am Ende des vorliegenden Abschnitts dargestellt wird, warum die hier behandelten Aspekte auch für Baustellenarbeitsprozesse relevant sind, wird anlehnend an bereits aufgeführte Aspekte explizit begründet, was sich grundlegend bei der Verwendung eines zentralen BIM-Modells im Hinblick auf digitale Baustellenkommunikationen ändert. Übergeordnetes Ziel des vorliegenden Abschnitts ist es aufzuzeigen, dass gemeinsame, auf Bauwerksinformationsmodellen basierende Kommunikationen in Zukunft auch für Prozesse auf Baustellen immer wichtiger werden. Die hier aufgezeigten Inhalte stellen darüber hinaus eine wesentliche Grundlage für die in Kapitel 5 verortete Online-Umfrage dar.

Formen und Ziel von Kommunikation

Bei Vorgängen der Kommunikation handelt es sich um Prozesse, in denen Informationen zwischen zwei oder mehreren menschlichen, technischen oder institutionellen Akteuren, meistens in Form von Nachrichten, ausgetauscht werden (vgl. Mehler-Bicher & Steiger 2014, S. 59; Schapke et al. 2015, S. 218). Im Sinne des bereits dargestellten *Sender-Speicher-Empfänger-Schemas* (vgl. Abb. 4.6) werden Informationen erfasst, im Kontext ausgewertet und für mögliche Weitergaben aufbereitet (vgl. Jehle et al. 2013, S. 23; Hartmann 2015, S. 53). Dabei sind die Austauschbedingungen immer situationsbezogen und kontextabhängig (vgl. Mehler-Bicher & Steiger 2014, S. 59), was insbesondere auf die bereits in Abschnitt 3.4 thematisierte Unikat Herstellung im Bauwesen bezogen werden kann. Durch die ebenfalls dort aufgeführten Herausforderungen aufgrund mannigfaltiger Gewerkeschnittstellen, wird im Hinblick auf die vor Ort stattfindenden Kommunikationsvorgänge auch von temporären Kollaborationen gesprochen. Es handelt sich diesbezüglich um einen Sammelbegriff für unterschiedliche Formen des Zusammenarbeitens, z. B. in gemischten Konstellation oder von variierender Dauer (vgl. Hacker 2014, S. 570; Schapke et al. 2015, S. 218). Unterscheidet man übergeordnet zwischen technischer und nicht-technischer Kommunikation, so kann im Hinblick auf eine zunehmend digitale Lebens- und Arbeitswelt vordergründig zwischen persönlichen Interaktionen und zeitlich versetzten Verbindungen differenziert werden. So müssen neben persönlichen Begegnungen, die als Gespräch oder im Rahmen eines arbeitsbezogenen Umfeldes auch

als Besprechung auffassbar sind, ebenfalls weitere echtzeitnahe Formen, z. B. Telefonate oder Videokonferenzen, genannt werden (vgl. Jehle et al. 2013, S. 22; Hacker 2014, S. 182; Hartmann 2015, S. 53). Darüber hinaus kann Kommunikation sowohl mithilfe digitaler, als auch mithilfe analoger Instrumente, stattfinden, z. B. beim Speichern bzw. Festhalten von Informationen in Form von Briefen, Faxen oder E-Mails (vgl. Jehle et al. 2013, S. 22). Innerhalb von Arbeitsprozessen werden mit den verschiedenen Kommunikationsarten mehrere Ziele verfolgt. So sind bspw. Steuerungen von Projekten, Weiterleitungen von Informationen, Unterweisungen von Teammitgliedern, Planungen und Koordinationen von Arbeitsprozessen sowie Auswertungen bereits ausgeführter Arbeitsergebnisse möglich (vgl. Hacker 2014, S. 183; Mehler-Bicher & Steiger 2014, S. 59; Schapke et al. 2015, S. 218).

Traditionelle Kommunikationsformen auf Baustellen

Wie bereits in Abschnitt 3.4 dargelegt, ist die Wertschöpfungskette *Bau* geprägt von stark arbeitsteiligen Prozessen mit einer großen Anzahl beteiligter Akteurinnen und Akteure (vgl. Hafner & Berlack 2018, S. 56). Abb. 4.1 können diesbezüglich die vielfältigen Möglichkeiten der Informationsweiterleitungen im Bauwesen entnommen werden. Die damit verbundenen Kommunikationsvorgänge werden darüber hinaus nicht nur durch die bereits in Abb. 4.2 aufgezeigte und mit zunehmendem Baufortschritt immer umfangreichere Informationsdichte erschwert (vgl. Jehle et al. 2013, S. 22), sondern insbesondere auch durch das Spezifikum der Nutzung zweidimensionaler Zeichnungen zum Austausch stets bauobjektbezogener Informationen (vgl. Jehle et al. 2013, S. 22; Braun et al. 2015, S. 25). Darüber hinaus sind aber nicht nur die konstruktiven Angaben zur Herstellung der jeweiligen Bauwerke auf geplotteten Zeichnungen zu finden, sondern i. d. R. laufen auch alle anderen planungs- und ausführungsrelevanten Abläufe papierbasiert ab (vgl. Schorr & Klaubert 2011, S. 145; Gillies 2017, S. 18). So werden die meisten bauwerksrelevanten Unterlagen, z. B. bei Dokumentationen des Baufortschritts oder beim Festhalten von Arbeitszeiten, auf Formblättern manuell zusammengetragen und in Ordnern aufbewahrt (vgl. Schorr & Klaubert 2011, S. 145; Jehle et al. 2013, S. 23; BM 2016, S. 109). Ein weiteres bauwesensspezifisches Beispiel hierfür sind ebenfalls die stets im Umlauf befindlichen zahlreichen Planstände, die infolge vielzähliger Indizes auf den jeweiligen Zeichnungen deutlich werden. Damit einher geht auch, dass auf diesen Papierplänen analoge Ergänzungen mit Markern – stellenweise aber auch digital mit Texten, Schraffuren und Skizzen – vorgenommen werden (vgl. Jehle et al. 2013, S. 23).

Betrachtet man im Rahmen des Bauwesens explizit die bauvorhabenbezogenen Kommunikationen kleinerer Handwerksbetriebe, so werden viele Prozesse mit verschiedenen Projektbeteiligten bereits häufig über E-Mails, oftmals aber auch noch über Briefe, Faxe und Telefonate abgewickelt (vgl. Berbig et al. 2003, S. 3; Jehle et al. 2013, S. 22; Rathswohl 2014, S. 92). Finden objektbezogene Kommunikationen darüber hinaus direkt auf Baustellen statt, z. B. in Form von regelmäßig angesetzten Koordinationssitzungen (vgl. Jehle et al. 2013, S. 22; Hausknecht & Liebich 2016, S. 25), so werden stets nicht alle am Bau beteiligten Gewerke mit einbezogen. Dies betrifft in vielen Fällen gerade

die ausführenden Kleinunternehmen. Häufig sitzen in projektbezogenen Baubesprechungen lediglich Bauleiter/-innen, Architekt/-innen, Bauherr/-innen und bestenfalls noch Polier/-innen zusammen. Ebenfalls finden in kleineren Bauunternehmen regelmäßige, strukturierte Absprachen zwischen Handwerker/-innen und Bauleiter/-innen nur sehr selten und häufig auch nur bei Bedarf bzw. auf Zuruf statt (vgl. Rathswohl 2014, S. 94; Gensicke et al. 2016, S. 34). Neben dem v. a. bei größeren Baustellen auftretenden Problem unklarer Zuständigkeiten – insbesondere aufgrund der bereits erwähnten temporären Projektzusammensetzung –, sind es auch eben die daraus resultierenden Gewerkeschnittstellen, die sich vielfältig nicht aus den chronologischen Abläufen der geplanten Prozessphasen ergeben (vgl. Schorr & Klaubert 2011, S. 149; Kölzer & Ranke 2014, S. 41), so dass Unstimmigkeiten nicht selten in persönlichen Gesprächen vor Ort geklärt werden müssen (vgl. Berbig et al. 2003, S. 3; Rathswohl 2014, S. 91). Positiv hingegen ist die Tatsache, dass durch das häufig bei kleineren Handwerksbetrieben traditionsgemäß vorzufindende familiäre und auf gegenseitiger Unterstützung beruhende Arbeitsklima dazu führt, dass Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter v. a. innerbetrieblich oft in direktem Kontakt stehen und somit fast regelmäßig untereinander kommunizieren (vgl. Berbig et al. 2003, S. 3; Jehle et al. 2013, S. 21; Rathswohl 2014, S. 87, S. 99 und S. 194).⁷ Auch wenn kleine Bauunternehmen häufig relativ flache Hierarchien aufweisen (vgl. Rathswohl 2014, S. 99) und die meisten Bereichszuordnungen und Organisationsstrukturen in vielen Handwerksbetrieben klar verteilt sind (vgl. Berbig et al. 2003, S. 4), werden interne Besprechungen aufgrund einer fehlenden Wissensmanagement-Strategie oftmals unstrukturiert und ggf. auch nur bei Bedarf durchgeführt (vgl. Helmus 2011, S. 60; Rathswohl 2014, S. 99 und S. 194).

Betrachtet man explizit die ebenfalls vielfältigen Kommunikationsvorgänge auf Baustellen, so finden sich auch dort die bereits zuvor erwähnten Instrumente zur Vermittlung von Informationen wieder. Neben den obligatorischen persönlichen Gesprächen vor Ort sind es vordergründig Telefonate, Handzeichen und Zurufe, projektbezogene Zeichnungen und aufgrund der Möglichkeit der Nutzung mobiler Endgeräte insbesondere auch E-Mails, die zur Weitergabe von Informationen genutzt werden (vgl. Rathswohl 2014, S. 103 und S. 107; Syben 2014, S. 66; Lindemann & Syben 2019, S. 21). Hier ist bereits zu erkennen, dass sich die Erfassung und Weitergabe von Informationen auf Baustellen als sehr vielschichtig und komplex darstellt (vgl. Jehle et al. 2013, S. 21; Lindemann & Syben 2019, S. 20). Da ein Ziel der Kommunikation im Bauwesen darin besteht, Information so zusammenzutragen und weiterzugeben, dass die jeweiligen Fachkräfte mit den entsprechenden Angaben in geeigneter Form und Qualität die stets objektspezifischen Baumaßnahmen erstellen können (vgl. Jehle et al. 2013, S. 23), ist es nicht nur wichtig, dass die notwendigen Ausführungsunterlagen an die Baustellen weitergegeben werden, sondern dass die darin enthaltenen Informationen von den Baufacharbeiterinnen und Baufacharbeitern so interpretiert werden können, dass die Arbeiten zur Errichtung

⁷Dieses Phänomen findet sich über alle Bauunternehmensgrößen hinweg auch bei größeren Baufirmen wieder (vgl. Rathswohl 2014, S. 99 und S. 194). Da der Fokus des vorliegenden Forschungsvorhabens auf kleinen und mittelständischen Bauunternehmen liegt, wird dieser Aspekt nicht weiter verfolgt.

von Bauvorhaben – bestenfalls ohne Rückfragen – stattfinden können (vgl. ebd.). Dies erfordert jedoch neben der grundlegenden gemeinsamen Fachsprache auch spezifische Qualifikationen auf Seiten der Ausführenden. So ist es vordergründig nicht nur relevant, dass sämtliche projektbezogenen Daten vorhanden sind, sondern auch dass entsprechende damit vernetzte Konventionen, z. B. Abkürzungen oder Schraffuren, verstanden werden. Die dafür notwendigen Kenntnisse werden – i. d. R. gewerkeübergreifend – in den beruflichen Ausbildungen vermittelt. Ohne entsprechendes grundlegendes Wissen können Kommunikationen auf Baustellen nur bedingt bzw. stellenweise nicht fachgerecht oder gar nicht stattfinden. Da ein aktueller Stand zur Kommunikation in kleinen und mittelständischen Bauunternehmen nicht vorliegt, dienen die hier angerissenen Faktoren als Grundlage für die in Abschnitt 5 verortete Online-Umfrage.

Probleme der Kommunikation auf Baustellen

Wie bereits angedeutet werden Baustellenkommunikationen durch die in Abschnitt 3.4 aufgeführten Besonderheiten, bspw. aufgrund instationärer Fertigungsorte oder infolge mannigfaltiger Gewerkeschnittstellen, erheblich geprägt (vgl. Jehle et al. 2013, S. 21). Hinzu kommen noch weitere – häufig rein baustellenspezifische Probleme – die es im Hinblick auf Kommunikationsvorgänge zu berücksichtigen gilt. So tritt vor Ort nicht selten der Fall ein, dass größerer Lärm persönliche Gespräche – auch über geringe Distanzen hinweg – stellenweise nur schwer stattfinden lässt. Zudem ist es ebenfalls nicht immer möglich, dass die innerhalb eines erhöhten Geräuschpegels alternativen Handzeichen, nicht nutzbar sind, da diese bspw. i. d. R. nur während einer Kranführerausbildung erlernt und somit nicht von allen Beteiligten verstanden werden. Darüber hinaus kann es stets passieren, dass die für die Ausführung wichtigen Bauzeichnungen im rauen Baustellenalltag so stark beschädigt oder verschmutzt werden, dass relevante Daten nicht mehr lesbar sind. Ebenfalls ist zu berücksichtigen, dass gerade im Bauwesen häufig Menschen aus unterschiedlichen Ländern mit vielen internationalen Sprachen auf Baustellen arbeiten. Eine Verständigung ist daher stellenweise erschwert und in manchen Fällen – z. B. wenn nur eine Vorarbeiterin oder ein Vorarbeiter eines Subunternehmens die deutsche Sprache spricht – nicht möglich.

Untersucht man explizit die papiergebundene Weitergabe von Informationen genauer, so lässt sich festhalten, dass eine damit einhergehende, bereits angesprochene Zettelwirtschaft ein grundlegendes Problem darstellt, weil durch die nicht miteinander verbundenen Dokumente ein lückenloses System nicht möglich ist (vgl. Helmus 2011, S. 60; Schorr & Klaubert 2011, S. 145). In erster Linie entstehen durch manuelle und auch individuell durchgeführte Zusammenstellungen unerwünschte Informationsbrüche, die nicht nur erhebliche Verzögerungen hervorrufen, sondern auch Datenverluste erzeugen können (vgl. Schorr & Klaubert 2011, S. 145; Willberg et al. 2011, S. 10; Jehle et al. 2013, S. 21, S. 23 und S. 26; Planen Bauen 4.0 2015b, S. 16). Neben einem damit einhergehenden erhöhtem Zeitaufwand, ist ebenfalls zu berücksichtigen, dass durch unterbrochene Informationsketten oder Übertragungsfehler zusätzlich Fehlinterpretationen, Missverständnisse, Unstimmigkeiten oder Widersprüche entstehen können (vgl. Schorr

& Klaubert 2011, S. 145; Jehle et al. 2013, S. 23; Rathswohl 2014, S. 27). Zusätzlich kommt hinzu, dass v. a. bei lokalen Ablagen, z. B. in Ordnern, oder bei unzureichenden Absprachen, z. B. bei versäumter Dokumentenübergabe, relevante Informationen ggf. nicht für alle Beteiligten sofort zugänglich sind (vgl. Schorr & Klaubert 2011, S. 145; Jehle et al. 2013, S. 21). Darüber hinaus stellen insbesondere die ebenfalls bereits angesprochenen Gewerkeschnittstellen erhebliche Probleme im Hinblick auf optimale Kommunikationsprozesse dar. So ist es nicht nur die mangelhafte Kommunikation der Gewerke untereinander, sondern häufig auch die geringe bereichsübergreifende Zusammenarbeit bzw. stellenweise sogar das aneinander Vorbeiarbeiten, das prozessrelevante Probleme hervorruft (vgl. Willberg et al. 2011, S. 10; Hausknecht & Liebich 2016, S. 25; Gillies 2017, S. 18). Im Hinblick auf die anstehenden Änderungen infolge Digitalisierung kann ebenfalls festgestellt werden, dass auch die nachgelagerten Kommunikationsprozesse auf Baustellen, z. B. in Form der bereits thematisch behandelten und i. d. R. nicht zeitnah – und damit häufig auch nicht rechtzeitig – auszuführenden Dokumentationsvorgänge, erst dann stattfinden, wenn sich im Rahmen eines Baustellenalltags Zeit dafür findet (vgl. Jehle et al. 2013, S. 26). Auch wenn die Digitalisierung erschwerend dazu beiträgt, dass bspw. der E-Mail-Schriftverkehr in kleinen und mittelständischen Bauunternehmen ansteigt oder mannigfaltige Software-Herausforderungen aufgrund unterschiedlicher Programm- und Austauschformate entstehen (vgl. Rathswohl 2014, S. 92; Braun et al. 2015, S. 19), kann dennoch positiv festgehalten werden, dass viele der anstehenden Veränderungen ebenfalls erhebliche Vorteile – insbesondere durch die neue Arbeitsweise im Rahmen von Building Information Modeling – im Hinblick auf die sich ändernden Kommunikationsprozesse bereitstellen. Die damit einhergehenden Möglichkeiten werden nachfolgend genauer betrachtet.

Wesentliche Änderungen der Kommunikation infolge BIM

Auch wenn Anwendungen mobiler Kommunikationstechnologien auf Baustellen noch wenig stark verbreitet sind (vgl. Klemt-Albert et al. 2018, S. 191), müssen die anstehenden Änderungen, die v. a. infolge BIM hervorgerufen werden, auch für die Prozesse auf Baustellen bzw. die Nutzung der Bauwerksinformationsmodelle Berücksichtigung finden (vgl. Leopoldseder 2016, S. 132). Durch die zentrale Bündelung der Informationen in einem Koordinationsmodell ändern sich nicht nur die Informatisierungsvorgänge, sondern auch die damit einhergehenden Kommunikationsprozesse (vgl. Hausknecht & Liebich 2016, S. 171; Tautschnig et al. 2017, S. 361). Auch wenn es keine allgemeingültige Lösung für eine optimale Informationsübertragung geben kann – unabhängig davon, ob es sich um ein analoges oder digitales Vorgehen handelt (vgl. Rathswohl 2014, S. 27) –, liefert die neue Arbeitsweise vielfältige Möglichkeiten die Kommunikationsvorgänge nicht nur zu verbessern, sondern im Rahmen der Baustellenpraxis auch zu erleichtern. So besteht bei Verwendung zentraler Bauwerksinformationsmodelle bspw. nicht mehr die Gefahr, dass Angaben auf verschiedenen Plänen irgendwann veraltet sind (vgl. Jehle et al. 2013, S. 22), sondern das stets aktuelle, und im besten Fall bereits ausführlich geprüfte Ausführungsunterlagen von den Bauausführenden genutzt werden können. Ein aufwendiges Suchen aktuell-relevanter Papierpläne entfällt somit. Die ebenfalls mit einer

zentralen Verortung von Informationen einhergehende personenungebundene bzw. vom Sender losgelöste Möglichkeit einer lückenlosen Kommunikation ist – genau wie der damit einhergehende Austausch des Wissens zwischen einzelnen Beteiligten – auch ohne digitale Hilfsmittel stets erstrebenswert (vgl. Rathswohl 2014, S. 26). So stellt die im Rahmen von BIM geforderte Einbindung aller Projektbeteiligten, über die zuvor erwähnten Koordinationsbesprechungen hinaus, eine weitere wesentliche Änderung dar (vgl. Böhle 2010, S. 163; Borrmann & Günthner 2011, S. 7; Fredenlund 2017, S. 71; Hafner & Berlack 2018, S. 56; VDI 2552-2 2018, S. 4).

Mit diesen Neuerungen gehen modifizierte Kommunikationsvorgänge und Aspekte der Transparenz einher (vgl. Willberg et al. 2011, S. 10; Möller 2015, S. 6), die letztendlich in einem erhöhten gegenseitigen Vertrauen, sowie in Fairness und Offenheit zwischen den Projektbeteiligten und in einem partnerschaftlichen und respektvolles Miteinander münden (vgl. Schapke et al. 2015, S. 218; Oesterreich & Teuteberg 2016, S. 1438; Schreyer 2016, S. 71-72). Um jedoch zu erreichen, dass – wie bereits in Abschnitt 3.1.1 thematisiert – alle Beteiligten auf Grundlage einer gemeinsamen Sprache, reibungslose Abwicklungen unterschiedlicher Bauvorhaben gewährleisten können, ist neben der Nutzung des zuvor erwähnten *BIM Collaboration Formats (BCF)* ebenfalls zu beachten, dass ein gemeinsames gewerkeübergreifendes Fachvokabular vorliegt. So sollten die zuvor genannten Aspekte für die Nutzung eines zentralen, aktuellen und bestenfalls lückenlosen Bauwerksinformationsmodells im Rahmen arbeitsprozessbezogener Untersuchungen bzw. im Hinblick auf angepasste Kommunikationsvorgänge stets berücksichtigt werden.

Relevanz zur Auseinandersetzung mit Kommunikationsvorgängen auf Baustellen

Die aufgeführten Probleme und Änderungen der traditionellen Kommunikationsvorgänge auf Baustellen erfordern v. a. im Hinblick auf die ebenfalls anstehenden digitalen Neuerungen eine besondere Berücksichtigung. So ist es bspw. nicht nur wichtig, dass Beziehungen und Verständigungen vor Ort – die infolge der angepassten und auf innovative Austauschprozesse ausgerichteten Kommunikationen zukünftig als effizienter und effektiver aufgefasst werden können – sich rein auf den Projekterfolg oder auf wirtschaftliche Aspekte beschränken (vgl. Dunkel & Wiehrich 2010, S. 178; Hacker 2014, S. 183; Hartmann 2015, S. 70; Planen Bauen 4.0 2015b, S. 16; Hausknecht & Liebich 2016, S. 16 und S. 147; Jokovic & Stockinger 2016, S. 50; Hafner & Berlack 2018, S. 54-55), sondern ebenfalls dass aus wissenschaftlicher Sicht berücksichtigt wird, wie sich die mannigfaltigen Interaktionen innerhalb von Berufs- und Aufgabenfeldern – und damit auch für Baustellen – infolge Digitalisierung ändern (vgl. Dunkel & Wiehrich 2010, S. 178; Hacker 2014, S. 183; Scharnhorst & Kaiser 2010, S. 11). Die Relevanz zur Auseinandersetzung mit den Kommunikationsprozessen wird zudem durch eine Empfehlung der Reformkommission *Bau von Großprojekten* deutlich. So ist neben einer zunehmenden Nutzung von BIM, ebenfalls von einer verstärkten Kooperation, sowie vom partnerschaftlichen Arbeiten in Teams – sowohl während der Planungs- als auch während der Bauausführungsprozesse – die Rede (vgl. Planen Bauen 4.0 2015b, S. 12).

Da in kleinen und mittelgroßen Bauunternehmen – bereits ohne digitale Neuerungen – eine Vielzahl von Problemstellungen in Bezug zum Wissensmanagement erwartet werden kann, ist es überaus wichtig zu berücksichtigen, dass die im vorliegenden Abschnitt angesprochenen Kommunikationsprozesse – in Kombination mit der in Abschnitt 4.1 thematisierten Informatisierung im Handwerk – eine wesentliche Rolle spielen werden (vgl. Rathswohl 2014, S. 16; Schönbeck 2016, S. 286, Highfield 2018, o. S.; Pilling 2019, S. 65). So wird bereits an einigen Stellen der Fachliteratur hervorgehoben, dass notwendige Kompetenzen im Hinblick auf die Kommunikationsvorgänge auf Baustellen im Rahmen von BIM von großer Bedeutung sind (vgl. Planen Bauen 4.0 2015*b*, S. 16; Beck & Nagel 2016, S. 13; Prüser 2016, S. 69; Kruppe et al. 2017, S. 5; Wieselhuber 2018, S. 29; Lindemann & Syben 2019, S. 17). Um jedoch mögliche Ausbildungsinhalte an die neue Methode BIM anpassen zu können, ist es neben dem Aufzeigen eines Verbesserungspotenzials (vgl. Bahlau & Klemt-Albert 2018, S. 293) ebenfalls wichtig, die aus den Änderungen resultierenden und notwendigen Qualifikationsanforderungen für Baufachkräfte explizit benennen können. Entsprechende damit einhergehende Empfehlungen werden in Abschnitt 6.2 aufgegriffen.

4.3 Übersicht zur Verwendung digitaler Technologien auf Baustellen

Im vorliegenden Abschnitt werden Angaben zum aktuellen Stand der Nutzung digitaler Medien in Deutschland aufgeführt. Dabei findet vorrangig ein Rückgriff auf das wissenschaftliche Diskussionspapier des *Bundesinstituts für Berufsbildung* (BiBB) statt (vgl. Gensicke et al. 2016). Es handelt sich bei dieser Veröffentlichung um eine Bestandsanalyse, bei der erforscht wurde, welche digitalen Medien in deutschen Unternehmen diverser Branchen eingesetzt werden.⁸ Im Zuge der Studie wurden persönlich-mündliche Befragungen von Anfang September bis Anfang Dezember 2015 in insgesamt 3.006 Betrieben durchgeführt (vgl. ebd., S. 13). Weitere wichtige Quellen für die Darstellung der Verwendung digitaler Technologien im vorliegenden Abschnitt ist eine Studie des *Instituts für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung* (vgl. Arntz et al. 2016), eine Untersuchung der Unternehmensberatung *Roland Berger GmbH* (vgl. Berger 2016) sowie eine BIM-Studie des *Fraunhofer Instituts für Arbeitswirtschaft und Organisation* (vgl. Braun et al. 2015). In Bezug auf die bereits in Abschnitt 4.1 behandelte Informatisierung in Bauunternehmen werden darüber hinaus auch Erkenntnisse aus der Dissertation von Rathswohl (2014) herangezogen. Auch internationale Veröffentlichungen wurden berücksichtigt, da einige Studien teilweise auch den deutschen Sektor untersucht haben.

An dieser Stelle sei vorab darauf hingewiesen, dass es sich bei den vielen Angaben meist nur um übergeordnete, häufig nach Branchen getrennten Untersuchungen handelt, bei denen oft jedoch nicht klar zwischen Aufgabenfeldern, z. B. Büro- oder Handwerkstätigkeiten, nach Betriebsebenen, z. B. wenn eine Nutzung auf Führungs- oder Mitarbeiterebene begrenzt ist, oder nach Unternehmensgrößen, separiert wurde (vgl. Gensicke et al. 2016, S. 29-30). Die insbesondere für das Bauwesen wichtige Trennung zwischen Planung und Ausführung wurde in keiner der nachfolgenden Studien berücksichtigt. Für das vorliegenden Forschungsvorhaben ist eine entsprechende Unterscheidung aufgrund der thematisch verorteten Inhalte jedoch explizit vorgenommen worden. So finden sich nachfolgend zuerst Angaben im Hinblick auf das Bauwesen allgemein, bevor daran anschließend die auf der Ausführungsseite angesiedelten Baustellentätigkeiten betrachtet werden. Ziel des vorliegenden Abschnittes ist es aufzuzeigen, dass die Prozesse auf Baustellen in den bereits durchgeführten Studien bisher nur am Rande berücksichtigt wurden. Durch das Aufzeigen des bisher wenig untersuchten sozio-technischen Systems *Baustelle* dienen die nachfolgenden Inhalte somit nicht nur als Begründung für die Durchführung der in Abschnitt 5 verorteten Online-Umfrage, sondern darüber hinaus auch als deren Grundlage.

⁸In der Studie des BiBB wird vorrangig die Bezeichnung *Medien* verwendet. Im vorliegenden Dokument werden zusätzlich die Begriffe *Gerät*, *Technologie* und *Werkzeug* nachfolgend äquivalent je nach Kontext abwechselnd herangezogen.

Branchenübergreifende Verbreitung digitaler Technologien in deutschen Betrieben

Im Jahr 2016 verwendete bereits etwa die Hälfte aller Betriebe in Deutschland moderne digitale Technologien (vgl. Arntz et al. 2016, S. 1). Die große Mehrheit nutzt dabei verschiedene auf dem Markt erhältliche Computergeräte (z. B. Desktop-PCs, Laptops), Telefone (z. B. Smartphones) oder andere, v. a. für Bürotätigkeiten typischen Geräte (z. B. Drucker, Scanner, Kopierer) (vgl. Gensicke et al. 2016, S. 21). In vielen Unternehmen spielt v. a. der Internetzugang eine wichtige Rolle, der fast flächendeckend in insgesamt 98 % aller Betriebe vorhanden ist (vgl. ebd., S. 25). Betrachtet man die in Abschnitt 2.4.5 dargestellten additiven Fertigungsverfahren, so kann für Deutschland festgehalten werden, dass 3D-Drucker bisher zwar nur in jedem zehnten Betrieb Anwendung finden, dafür aber im Sektor der stationären Fertigung mit bis zu 30 % bereits recht stark verortet sind (vgl. Gensicke et al. 2016, S. 26; BMWi 2017, S. 6). Der Anteil von Betrieben hingegen, die digitale Neuentwicklungen wie Datenuhren, Head-Mounted-Displays, Wearables oder Datenbrillen einsetzen, liegt gemittelt im gesamten Bundesgebiet noch unter 3 % (vgl. Gensicke et al. 2016, S. 27).

Auch wenn übergeordnet festgehalten werden kann, dass digitale Geräte in kleineren Betrieben, die sich bisher weniger mit modernen digitalen Technologien auseinandergesetzt haben als größere Unternehmen (vgl. Arntz et al. 2016, S. 5), viel seltener zum Einsatz kommen (vgl. Gensicke et al. 2016, S. 31), fehlen generell repräsentative Datengrundlagen zur Unterscheidung, in welchen Bereichen, in welcher Form und in welchem Umfang digitale Arbeits- und Hilfsmittel in einzelnen Branchen tatsächlich eingesetzt werden (vgl. Kölzer & Ranke 2014, S. 38; Gensicke et al. 2016, S. 12 und S. 30). Da dies auch auf den im vorliegenden Forschungsvorhaben behandelten Bereich *Baustelle* zutrifft, wurde die in Kapitel 5 verortete Online-Umfrage erstellt. Die damit verbundene Tatsache, dass im Bauwesen vordergründig kleine und mittelständische Bauunternehmen zu finden sind, wird zuvor in Abschnitt 4.4 aufgezeigt.

Betrachtet man neben der Verbreitung digitaler Technologien in deutschen Betrieben deren Einsatzgebiete, so kann festgehalten werden, dass die beiden wichtigsten Tätigkeiten Informationsbeschaffung und externe Kommunikationsprozesse sind (vgl. Gensicke et al. 2016, S. 34).⁹ Diese Erkenntnis bezieht sich auf mehrere Branchen in Deutschland, ist aber, wie bereits zuvor gezeigt, insbesondere durch die Nutzung digitaler Bauwerksinformationsmodelle zukünftig vermehrt auch für die Prozesse auf Baustellen von großer Bedeutung (vgl. Abschnitt 2.3). Da die Nutzung zentraler BIM-Modelle äquivalent den in Abschnitt 3.1.1 genannten Cloud-Anwendungen entspricht, soll abschließend erwähnt werden, dass bereits über die Hälfte der deutschen Unternehmen entsprechende Cloud-Lösungen — insbesondere in der stationären Industrie – nutzen (vgl. van Renssen et al. 2016, S. 4; BMWi 2017, S. 6).

⁹In der Bestandsanalyse des BiBB (Gensicke et al. 2016) finden sich auf den Seiten 34 und 60 entsprechende Balkendiagramme mit insgesamt 11 Angaben; auch auf S. 77 der Studie wird die Aussage zur Informationsbeschaffung und externen Kommunikation wiederholt. Die Wichtigkeit beider Bereiche wurde im vorliegenden Dokument bereits in den Abschnitten 4.1 und 4.2 aufgezeigt.

Verbreitung digitaler Technologien im Bauwesen

Nimmt man die 241 befragten Bauunternehmen, die in der Studie des BiBB befragt wurden und bezieht diese auf die insgesamt 3.006 berücksichtigten Betriebe, so macht das Baugewerbe bei der Umfrage einen Anteil von 8 % aus. Von den 241 Bauunternehmen hatten dabei 134 Betriebe zwischen 1 und 19 Mitarbeiter (vgl. Gensicke et al. 2016, S. 14). Neben der Unternehmensgröße ist vordergründig ebenfalls zu berücksichtigen, dass bei der Befragung keine Unterteilung in Bauplanung und Bauausführung stattgefunden hat. Dies wird bspw. durch die Angaben zur Nutzung von Geräten mit Internetzugang deutlich. Die Umfrage ergab, dass auch im Bauwesen bereits 98 % der Betriebe über einen entsprechenden Zugang verfügen (vgl. Gensicke et al. 2016, S. 27). Es ist jedoch davon auszugehen, dass viele Teilnehmerinnen und Teilnehmer der Umfrage in der Planung tätig sind und daher in den Büros einen Internetzugang haben.¹⁰ Eine Studie der *Roland Berger GmbH*, die sich explizit auf das Bauwesen bezieht, zeigt bzgl. des Internetzugangs geringere Werte (vgl. Berger 2016, S. 7). Auch wenn in der Umfrage 41 % der Teilnehmerinnen und Teilnehmer angeben, dass ihr Zugang zu einem PC bzw. zum Internet bei über 80 % liegt, sind es immerhin 12 %, die sagen, dass ihre Möglichkeiten eines Zugangs unter 20 % liegen (vgl. ebd.). In vielen Unternehmen in der Bauindustrie verfügen darüber hinaus lediglich 20 % bis 40 % der Belegschaft über einen Zugang zu PC und Internet (vgl. ebd.). Auch bei dieser Studie fand keine Trennung zwischen Planung und Ausführung statt.

Auch wenn einer britischen Studie zufolge in England nur 31 % der Bauunternehmen ihren Angestellten Smartphones zur Verfügung stellen (vgl. Koutsogiannis 2019, o. S.), lassen überdurchschnittlich viele Betriebe aus dem Baugewerbe grundsätzlich zumindest die Nutzung auch von privaten mobilen Geräten zu (vgl. Gensicke et al. 2016, S. 36-37). Dass tragbare Technologien v. a. auf Baustellen eingesetzt werden, hängt stark mit der bereits in Abschnitt 3.4 erörterten instationären Fertigung zusammen (vgl. Gensicke et al. 2016, S. 47). Diesbezüglich kann festgehalten werden, dass im Arbeitsalltag auf Baustellen Smartphones häufiger eingesetzt werden als Tablets (vgl. Berger 2016, S. 7; Gensicke et al. 2016, S. 33).¹¹ Betrachtet man darüber hinaus die Verbreitung von Software-Applikationen im Bauwesen, so kann nach Baumanns et al. (2016) von einer *mittlere Verwendung* gesprochen werden (vgl. ebd., S. 20). Die Nutzung digitaler Neuentwicklungen, z. B. von Datenuhren, Head-Mounted-Displays, Wearables oder Datenbrillen, weist im Baugewerbe jedoch mit 1,1 % einen sehr geringen Wert auf (vgl. Gensicke et al. 2016, S. 28). Eine Verwendung von Virtual Reality und Augmented Reality ist in Deutschland im Vergleich zum englischen Bauwesen geringer. Dort nutzen 13 % bzw. 28 % VR- und AR-Anwendungen sowie 22 % 3D-Scans (vgl. Gerrard 2019, o. S.; Koutsogiannis 2019, o. S.).

¹⁰In der Umfrage wird lediglich nach Branchen und nicht nach Tätigkeitsbereichen unterschieden (vgl. Gensicke et al. 2016, S. 13-15).

¹¹Eine englische Studie weist sehr viel höhere Werte auf. So sind es nach Gerrard (2019) lediglich 20 % der Beteiligten, die gar keine Tablets bei Bauprojekten einsetzen und mehr als die Hälfte (52,2 %) sind es, die diese mobilen Endgeräte bereits routiniert als Zugang zu Projektinformationen nutzen.

Über die hier aufgeführte kurze Darstellung der bisher eher geringen Verbreitung von digitalen Technologien im Bauwesen hinaus, kann nach einer Studie des *Fraunhofer Instituts für Arbeitswirtschaft und Organisation* aus dem Jahre 2015, ebenfalls festgehalten werden, dass ein Großteil der Beteiligten in der Bauindustrie – es handelt sich hierbei u. a. um Architekt/-innen, Tragwerksplaner/-innen, Facharbeiter/-innen und Wissenschaftler/-innen – keinen Nutzen für einige innovative Werkzeuge sieht (vgl. Braun et al. 2015, S. 25). So ist mehr als jeder dritte Befragte der Meinung, dass 3D-Laserscanner (45 %), Augmented Reality (37 %) und Virtual Reality (35 %) für ihre Unternehmen im Planungs- und Bauprozess keinen Relevanz haben werden (s. Abb. 4.9).

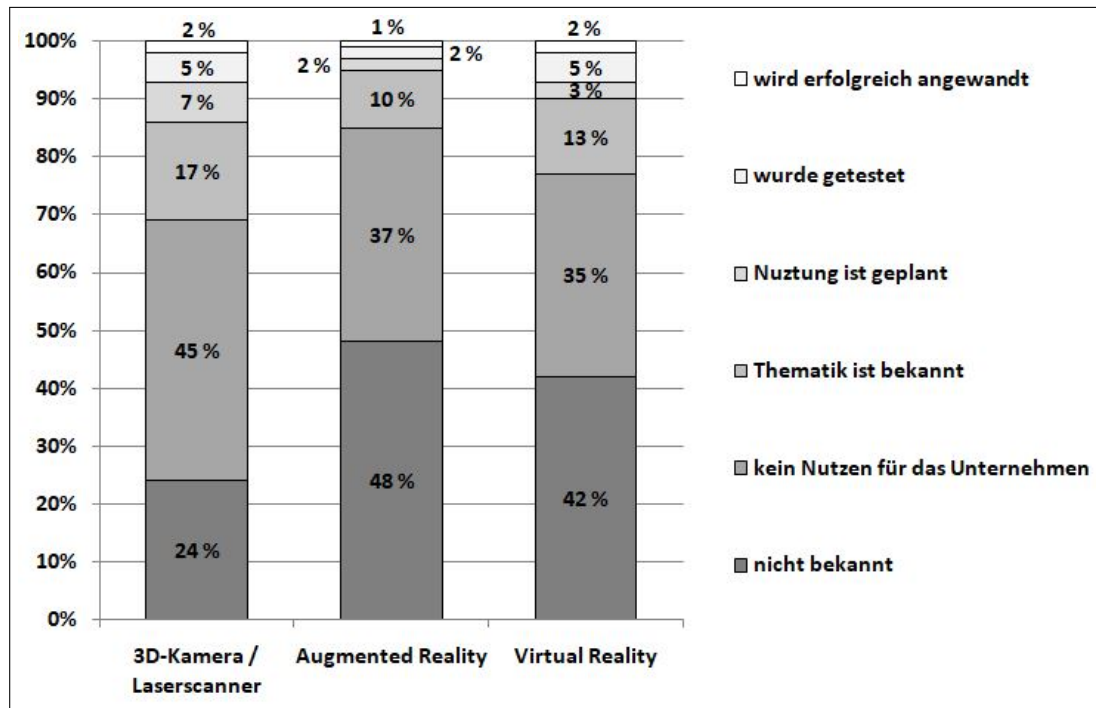


Abb. 4.9: Einsatz digitaler Werkzeuge im Bauwesen (eigene Darstellung nach Braun et al. 2015, S. 25)

Lediglich 5 % der Befragten verwenden die Technologien erfolgreich in ihren Projekten (vgl. ebd.). Auch eine Verbreitung des 3D-Drucks ist – wie bereits angedeutet – v. a. im Bauwesen noch sehr gering (vgl. Baumanns et al. 2016, S. 20; van Renssen et al. 2016, S. 21; Koutsogiannis 2019, o. S.). Insgesamt kann an diese Erkenntnisse anknüpfend und in Anlehnung an Gensicke et al. (2016) zusammenfassend festgehalten werden, dass im deutschen Bauwesen interaktive Werkzeuge bisher nur selten Einsatz finden (vgl. ebd., S. 39). Die Tatsache, dass weniger als 6 % der Unternehmen aktuell digitale Planungsinstrumente vollständig nutzen (vgl. Berger 2016, S. 2), lässt zusätzlich darauf schließen, dass eine Verwendung entsprechender Arbeitsmittel auf Baustellen noch sehr viel unwahrscheinlicher ist, was im im folgenden Abschnitt genauer aufgezeigt wird.

Einsatz digitaler Technologien auf Baustellen

Schaut man sich explizit die Verbreitung digitaler Technologien auf Baustellen an, so ist auch hier festzuhalten, dass nach Aussagen unterschiedlicher Studien kein einheitliches Bild vorherrscht. Einer amerikanischen Untersuchung zufolge sollen im Jahr 2014 bereits 75 % der Facharbeiterinnen und Facharbeiter auf deutschen Baustellen mit mobilen Endgeräten gearbeitet haben (vgl. McGraw 2014, S. 39). Ähnlich hohe Werte lieferte ein Jahr später der Forschungsbericht 468 des *Bundesministeriums für Arbeit und Soziales* (vgl. Arnold et al. 2015). Dort wird der Nutzungsanteil von Informations- und Kommunikationstechnologien für die Berufsgruppe Bau- und Ausbau mit 59 % angegeben (vgl. ebd., S. 28). Auch Rathswohl (2014) führt auf, dass auf Baustellen kleinerer und mittlerer Unternehmen bereits alle Mitarbeiter mit Computern, Digitalkameras o. Ä. ausgestattet sind bzw. der Anteil von Notebooks bei ca. 50 % liegt (vgl. Rathswohl 2014, S. 104 und S. 113). Ebenfalls wird von der *Handwerkskammer Erfurt* aufgeführt, dass in allen Betrieben – insbesondere aber bei Verwaltungsvorgängen – mehrmals täglich digitale Endgeräte genutzt werden (vgl. HWK Erfurt 2016, S. 1).

Interessant ist darüber hinaus jedoch die Tatsache, dass lediglich 2 % der kleinen Betriebe mit weniger als 20 Beschäftigten – hier unabhängig von der Branche – mit Datenuhren, Wearables, Head-Mounted-Displays oder Datenbrillen arbeiten (vgl. Gensicke et al. 2016, S. 26). Überträgt man solche Erkenntnisse auf die instationären und bauhandwerklichen Gegebenheiten, so kann davon ausgegangen werden, dass digitale Technologien derzeit eher punktuell – wenn überhaupt – Anwendung auf Baustellen finden (vgl. Kölzer & Ranke 2014, S. 39).

Betrachtet man explizit den Digitalisierungsgrad bei den Berufen *Maurer/-innen* und *Stahlbetonbauer/-innen*, so ist zu beobachten, dass dieser sich ebenfalls auf einen niedrigen bis mittleren Niveau befindet (vgl. HWK Erfurt 2016, S. 1). Zusammenfassend kann insgesamt festgehalten werden, dass das „Bild eines Bauarbeiters, der seine Arbeit mithilfe des Tablets organisiert, [...] bei Weitem noch nicht der Realität auf den Baustellen [entspricht]“ (Berger 2016, S. 7). Wie der genaue Stand zur Verwendung digitaler Arbeits- und Hilfsmittel vor Ort aussieht, wird im Rahmen des Forschungsvorhabens mithilfe der Online-Umfrage in Kapitel 5 analysiert.

Abschließend sei noch ein kurzer Überblick über die Nutzung digitaler Technologien in der Ausbildung im Bauwesen erlaubt. Dort haben digitale Medienformate – z. B. auf betrieblicher Seite mit insgesamt 32 % – überwiegend eine unterdurchschnittliche Bedeutung (vgl. Gensicke et al. 2016, S. 49 und S. 54). Während die Nutzung des Internets bereits bei 72 % liegt (vgl. ebd., S. 46), werden v. a. die zuvor aufgeführten digitalen Neuentwicklungen, wie Datenuhren, Head-Mounted-Displays, Wearables oder Datenbrillen, in der betrieblichen Ausbildung im Baugewerbe mit gerade mal 2 % genutzt (vgl. ebd., S. 47).

4.4 Übersicht zur Struktur des Bauwesens in Deutschland

Anknüpfend an die bereits in Abschnitt 3.1.3 aufgeführten Veränderungen für Bauunternehmen sowie durch die im vorangegangenen Abschnitt 4.3 gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich einer geringen Verbreitung digitaler Arbeitsmittel im gesamten Bauwesen, wird im vorliegenden Abschnitt aufgezeigt, dass eine Berücksichtigung kleiner u. mittelständischer Betriebe für das Forschungsvorhaben eine wesentliche Rolle spielt. Die nachfolgend dargestellte Kurzübersicht zu Unternehmensgrößen und Beschäftigtenzahlen verdeutlicht, dass es sich bei den existierenden Bauunternehmen in Deutschland hauptsächlich um Handwerksbetriebe mit einer geringen Anzahl an Beschäftigten handelt. Dies ist insbesondere für die durchgeführte Online-Umfrage in Kapitel 5 von großer Bedeutung, da „bei einer Analyse eines Teilbereichs beruflicher Facharbeit oder bei der Untersuchung durch nur wenige Fallstudien sicherzustellen [ist], dass solche Betriebe und Arbeitsplätze einbezogen [werden], die für die Kompetenzanforderungen des Berufs repräsentativ sind“ (Becker & Spöttl 2008, S. 206). So wird im vorliegenden Abschnitt nachfolgend zuerst dargestellt, wie die allgemeine Struktur im Bauwesen aufgebaut ist, um daran anknüpfend aufzuzeigen, warum insbesondere die kleinen und mittelständischen Unternehmen berücksichtigt werden sollten. Am Beispiel des Massivbaus werden entsprechende Belege weiterführend betrachtet. Für die Darstellungen aktueller Verhältnisse werden neben Angaben des *Statistischen Bundesamtes*, der *Bundesagentur für Arbeit* auch vereinzelt Aussagen aus einschlägiger Fachliteratur herangezogen.

Allgemeine Struktur zum Bauwesen in Deutschland

Das Bauwesen beinhaltet aufgrund seiner produktionsbezogenen Ausrichtung das Berufsfeld der *be-, verarbeitenden* und *instandsetzenden Berufe* (vgl. Helmrich 2010, S. 17). Diese Berufe werden – zusammen mit den Handwerksunternehmen in denen sie ausgeübt werden – bestimmten Gewerbebezweigen bzw. Gewerbegruppen zugeordnet (vgl. Harten et al. 2018, S. 13). Häufig findet dabei eine Unterscheidung zwischen den beiden Gruppen *Bauhauptgewerbe* und *Ausbaugewerbe* statt (vgl. Destatis 2017, S. 7). Zum Bauhauptgewerbe zählen z. B. die Bereiche des Maurer- und Stahlbetonbauhandwerks, aber auch der Straßen-, und Gerüstbau sowie das Zimmerer- bzw. Dachdeckerhandwerk (vgl. Harten et al. 2018, S. 7). Die Inhalte des Massivbaus können darüber hinaus aufgrund der Haupttätigkeiten, der Durchführung bzw. Errichtung von Bauvorhaben, übergeordnet ebenfalls dem *Berufssegment* der *Bau- und Ausbauberufe* zugeordnet werden (vgl. Bundesagentur für Arbeit 2015, S. 8-9).¹² Eine weitere Abgrenzung findet dann innerhalb dieses Segmentes statt: Der Massivbau wird dabei den *Hochbauberufen* zugeschrieben (vgl. ebd.).¹³

¹²Neben dem Berufssegment *Bau- und Ausbauberufe* existieren 13 weitere Berufssegmente; näheres dazu kann in Bundesagentur für Arbeit (2015) nachgelesen werden. Die Bauberufe werden darüber hinaus dem *Berufshauptfeld* 4 (BHF 4) zugeordnet (vgl. Wolter et al. 2015, S. 31).

¹³Drei weitere Bereiche sind die *Bauplanungs-, Architektur- u. Vermessungsberufe*, die *Innen- u. Ausbauberufe* sowie die *Gebäude- u. versorgungstechnischen Berufe* (vgl. Bundesagentur für Arbeit 2015, S. 9).

Spricht man im Bauwesen von bekannten Bauunternehmen so werden häufig die drei größten Bauunternehmen *Hochtief*, *Strabag* und *Züblin* genannt. Die *Hochtief AG* aus Essen hatte im Jahr 2017 im Jahresdurchschnitt insgesamt 54.236 Beschäftigte, die *Strabag AG* aus Köln 25.738 Beschäftigte und die *Ed. Züblin AG* aus Stuttgart insgesamt 13.739 Beschäftigte (vgl. Bauindustrie 2018, o. S.).¹⁴ Auch wenn diese Großkonzerne eine überdurchschnittliche Anzahl an Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern aufweisen, handelt es sich bei den meisten Ausführungsfirmen im Bauhauptgewerbe dennoch um Unternehmen mit sehr wenigen Beschäftigten (vgl. Meyser & Uhe 2006, S. 151; Meyser 2010, S. 56; Rathswohl 2014 S. 9; Planen Bauen 4.0 2015a, S. 15; Hausknecht & Liebich 2016, S. 20; Lindemann & Syben 2019, S. 8). So machen kleine und mittelgroße Betriebe einen wesentlichen Anteil des sog. *Mittelstandes* aus, bei dem überwiegend Leistungen aus einer Hand ausgeführt werden (vgl. Mohr et al. 2017, S. 2). Hinzu kommt, dass viele dieser Bauunternehmen eher auf dem Land angesiedelt sind (vgl. van Renssen et al. 2016, S. 15). Innerhalb des Bauwesens handelt es sich bei allen diesen *Handwerksunternehmen* um Betriebe, die in den Handwerksrollen oder in den Verzeichnissen der Gewerbe eingetragen sind (vgl. Destatis 2018, S. 5-6; Harten et al. 2018, S. 13).¹⁵

Verortung und Anzahl von Handwerksunternehmen im Bauhauptgewerbe

Möchte man nun wissen, wie die Verteilung von Handwerksunternehmen in Deutschland aussieht, kann man sich an den Handwerkszählungen des *Statistischen Bundesamtes* orientieren (vgl. Destatis 2019). Bei einer durchgeführten Zählung aus dem Jahr 2017 wurden grundlegend fünf Beschäftigtengrößenklassen herangezogen (vgl. Destatis 2019, S. 7). Diese sind in Tab. 4.1 in der ersten Spalte zu finden.

Tab. 4.1: Handwerksunternehmen im Bauhauptgewerbe 2017 (eigene Tabelle nach Destatis 2019, S. 12)

Kategorien nach Beschäftigtenzahlen	Unternehmen insgesamt	Anteil Unternehmen [%]	Tätige Personen insgesamt	Anteil Personen [%]	Tätige Personen je Unternehmen
unter 5	34.573	49	72.421	10	2
5 bis 9	16.941	24	112.900	16	7
10 bis 19	11.305	16	151.654	21	13
20 bis 49	5.860	8	170.192	23	29
50 und mehr	1.833	3	217.374	30	119
Bauhauptgewerbe gesamt	70.512	100	724.541	100	10

¹⁴Die Züblin AG gehört zum Konzern der Strabag AG, wird in Bauindustrie (2018) jedoch gesondert aufgeführt.

¹⁵Per Definition kann ein Unternehmen mehrere Betriebe umfassen (vgl. Harten et al. 2018, S. 13). Im vorliegenden Forschungsvorhaben handelt es sich aufgrund der Betriebsgröße lediglich um kleine und mittelständische Bauunternehmen.

Betrachtet man den prozentualen Anteil von Bauunternehmen, so kann der dritten Spalte entnommen werden, dass fast die Hälfte aller Bauunternehmen (49 %) i. d. R. weniger als fünf Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer beschäftigt. Und auch die Betriebe mit Angaben zwischen fünf und neun Beschäftigten nehmen mit 24 % ein Viertel der Mitarbeiterinnen bzw. Mitarbeiter im gesamten Bauhauptgewerbe ein. Während diese Bauunternehmen im Durchschnitt sieben Personen beschäftigen, sind es bei den kleinsten Betrieben im Mittel lediglich zwei Beschäftigte. Die großen Unternehmen – wie oben bereits angedeutet – beschäftigen mit insgesamt fast 220.000 Personen in Summe nur 30 % der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter.

Ähnlich klare Werte liefert eine Veröffentlichung von Schwerdtner aus dem Jahr 2018.¹⁶ Dort findet sich ebenfalls ein Großteil der tätigen Personen im Bauhauptgewerbe in Betrieben zwischen 1 bis 19 Mitarbeiter/-innen (vgl. ebd., S. 227). In Abb. 4.10 ist diesbezüglich zu erkennen, dass auch hier fast die Hälfte (45 %) in entsprechend kleinen Betrieben beschäftigt sind. Ebenfalls ersichtlich wird, dass die großen Konzerne einen vergleichsweise geringen Anteil an Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern aufweisen.

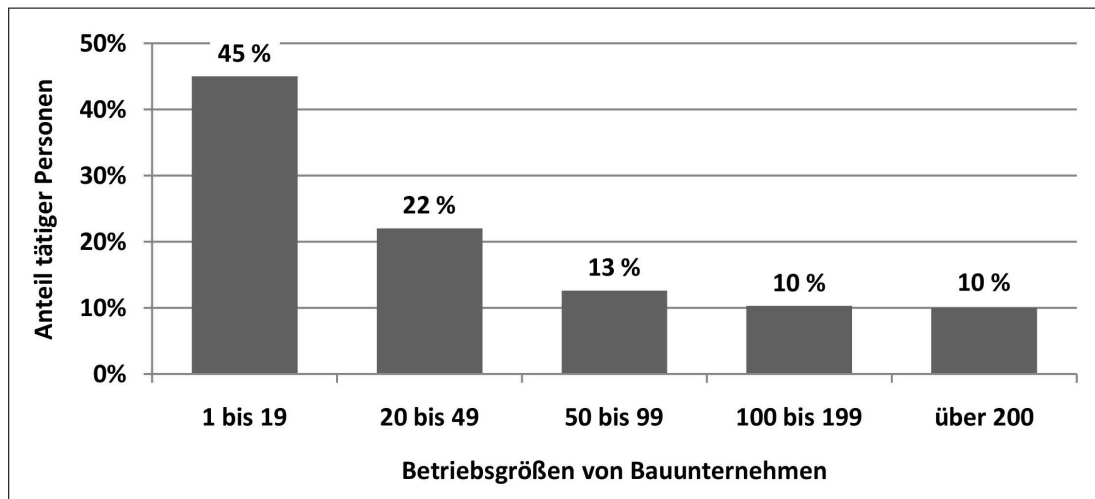


Abb. 4.10: Tätige Personen im Bauhauptgewerbe 2016 (eigene Darstellung nach Schwerdtner 2018, S. 227)

Betrachtet man nun bspw. die Berufe von *Maurer/-innen* und *Stahlbetonbauer/-innen*, so können ebenfalls Zahlen des *Statistischen Bundesamtes* herangezogen werden. Tab. 4.2 zeigt diesbezüglich, dass sich auch bei Bauunternehmen im Massivbau – die günstigerweise gemeinsam aufgeführt werden – ein ähnliches Bild wie im gesamten Bauhauptge-

¹⁶Zu beachten ist, dass die Einteilung nach Schwerdtner (2018) nicht der Einteilung des *Statistischen Bundesamtes* entspricht. Die Werte des Bundes decken sich jedoch mit kleinen Abweichungen mit Werten aus dem Jahre 2013 von Rathswohl (2014, S. 10) und den hier ebenfalls dargestellten Werten von Schwerdtner (2018, S. 227). Für die Online-Umfrage in Abschnitt 5 wurde die Einteilung nach (Destatis 2017) herangezogen.

werbe ergibt. So sind es auch hier die Hälfte der Betriebe (50 %), die weniger als fünf Personen beschäftigen. Bei insgesamt 17.652 Unternehmen und 32.817 darin tätigen Mitarbeiter/-innen ergibt sich eine mittlere Beschäftigtenzahl von ca. zwei Personen je Unternehmen. Bei den großen Firmen sind diese Zahlen wiederum gegenläufig. Mit insgesamt 117.844 Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmern in nicht mal tausend Betrieben entsteht eine Beschäftigtenzahl von 119 Mitarbeiter/-innen je Unternehmen.¹⁷

Tab. 4.2: Maurer- und Betonbauunternehmen im Bauhauptgewerbe 2015 (eigene Tabelle nach Destatis 2017, S. 16)

Kategorien nach Beschäftigtenzahlen	Unternehmen insgesamt	Anteil Unternehmen [%]	Tätige Personen insgesamt	Anteil Personen [%]	Tätige Personen je Unternehmen
unter 5	17.652	50	32.817	9	2
5 bis 9	7.769	22	48.774	14	6
10 bis 19	5.569	16	72.737	20	13
20 bis 49	3.022	9	86.643	24	29
50 und mehr	994	2840	117.844	33	119
Bauhauptgewerbe gesamt	35.006	2937	358.815	100	10

Wie im vorliegenden Abschnitt gezeigt, machen gerade die kleinen und mittelständischen Bauunternehmen einen Großteil der Betriebe im Bauhauptgewerbe aus. Um einen aktuellen Stand über die Verwendung digitaler Arbeits- und Hilfsmittel im Bauwesen zu erlangen, werden für die Online-Umfrage im folgenden Kapitel 5 explizit diese Unternehmen befragt.

¹⁷ Anders als bei den Angaben zum gesamten Bauhauptgewerbe in Tab. 4.1 finden sich bei den Beschäftigtenzahlen im Massivbau auch abweichende Werte. So gibt der bereits in Abschnitt 3.2 erwähnte *Job-Futuromat* des *Instituts für Arbeitsmarkt und Berufsforschung (IAB)* an, dass Ende 2017 im Maurerhandwerk lediglich 91.927 Beschäftigte und im Beton- und Stahlbetonbau 32.207 Beschäftigte angestellt waren (vgl. *Futuromat* 2019, o. S.). Zusammenaddiert ergeben sich somit insgesamt 124.134 Arbeitnehmer/-innen. Auch wenn dies im Vergleich zu den in Tab. 4.2 angegebenen 358.815 ein wesentlich geringerer Wert ist, werden für das vorliegenden Forschungsvorhaben die Angaben des *Statistischen Bundesamtes* zugrunde gelegt. Eine Begründung für entsprechende Abweichungen lassen sich voraussichtlich an den jeweiligen unterschiedlichen Gruppierungen bzw. Kategorisierungen diverser Einrichtungen festmachen.

5 Online-Umfrage zur Verwendung digitaler Geräte auf Baustellen

5.1 Methodisches Konzept zur Online-Umfrage

Im vorliegenden Abschnitt wird zuerst das übergeordnete methodische Konzept zur Erstellung des Fragebogens erläutert. Es wird dargelegt, wie das explizite Vorgehen der Umfrage aussieht und welche generellen Absichten hinter der Befragung stecken. Daran anschließend wird das Prinzip eines standardisierten Fragebogens erläutert sowie die Wahl der verwendeten Fragetypen und Skalen innerhalb der entwickelten Fragebatterien begründend vorgestellt. Mit Bezug auf die Auswahl der befragten Bauunternehmen wird weiterhin dargelegt, welche Grundgesamtheit herangezogen wurde und wie die daraus entnommenen Stichproben zu Stande gekommen sind. Abschließend wird das verwendete Online-Befragungstool *LimeSurvey* dargestellt.

Übergeordnetes Konzept und Ziel der Online-Umfrage

Um für die Online-Umfrage ein solides theoretisches Fundament zur Verfügung zu haben (vgl. Atteslander 2010, S. 6), wurde die in Kapitel 2 dargestellte Vorstudie zur Digitalisierung im Bauwesen durchgeführt. Eine entsprechende Sektoranalyse ist im Hinblick auf weitere Erkenntnisgewinne notwendig, um damit einhergehende Untersuchungen systematisch vorzubereiten und gleichzeitig die Repräsentativität der Stichproben für die jeweiligen Forschungsinstrumente abzusichern (vgl. Spöttl & Windelband 2013, S. 193). Die Erhebungen der standardisierten Befragung runden damit stellenweise die bereits gewonnenen Erkenntnisse der Sektoranalyse ab (vgl. ebd.). Auch wurde durch das Aufzeigen neuer technologischer Innovationen in Kapitel 2 sichergestellt, dass der hier entwickelte Fragebogen forschungsrelevante Aspekte berücksichtigt und somit dem übergeordneten Thema gerecht wird (vgl. Petersen 2014, S. 27). Der Fragebogen stellt somit durch die Verknüpfung von Theorie und empirischer Analyse ein wichtiges Kernelement innerhalb des Forschungsvorhabens dar (vgl. Porst 2014, S. 16). Die Fragen des Fragebogens werden nachfolgend durch die Berücksichtigung der in Abschnitt 2.4 aufgeführten digitalen Arbeitsmittel mit den für die Umfrage entwickelten Thesen zusammengebracht (vgl. ebd.). Der Fragebogen selbst ist sukzessiv und reflektiv auf Grundlage von Erkenntnissen aus einschlägiger Fachliteratur zur Erstellung von Fragebögen entwickelt worden. Für die standardisierte Befragung bilden dabei insbesondere die Konzepte und Phasen nach Brancato et al. (2006, S. 121) und Reinecke (2014, S. 602) eine wesentliche Grundlage. In Abb. 5.1 ist zu erkennen, welche Schritte im Gesamtprozess zum endgültigen Erkenntnisgewinn vorgenommen wurden.

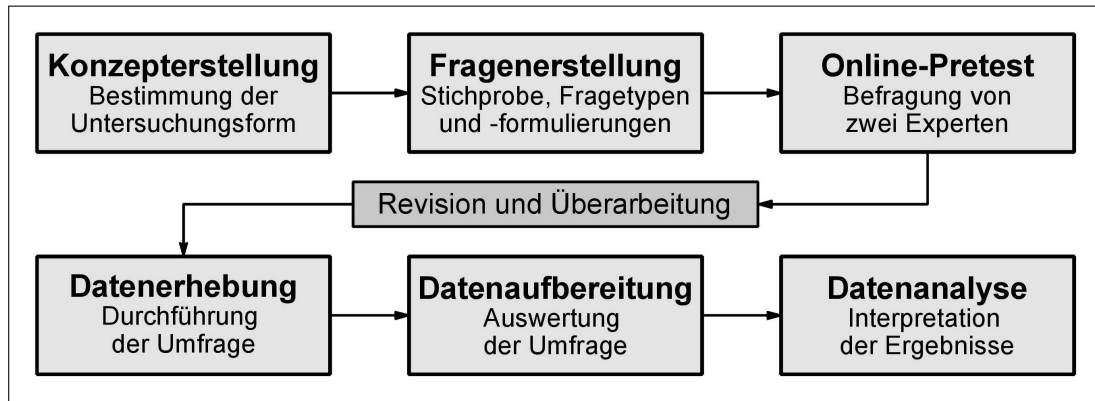


Abb. 5.1: Konzept zur Online-Umfrage (eigene Darstellung in Anlehnung an Brancato et al. (2006, S. 121) und Reinecke (2014, S. 602))

Vom Forschungsproblem und den damit einhergehenden Fragestellungen ausgehend (vgl. Abschnitt 1.1), wurden zur Präzisierung und Formulierung der Fragen die notwendigen Grundlagen in Kapitel 2 erfasst. In Kombination mit den nachfolgend behandelten Aspekten zur Erstellung von Fragebögen ist das darauf aufbauende Gesamtkonzept entwickelt worden: Die zu untersuchende Fragestellung wurde in Form eines standardisierten Fragebogens operationalisiert, so dass die auf die Thesen bezogenen Variablen bzw. Antwortmöglichkeiten gemessen werden konnten (vgl. Becker & Spöttl 2008, S. 45). Wie in Abb. 5.1 dargestellt, folgte auf den Prozess der Fragenerstellung zunächst die Absicherung des Fragebogens durch einen Pretest. Dabei wurden im Vorfeld zu den umfangreichen Befragungen nicht offensichtliche Probleme beim Ausfüllen der Fragen aus dem Weg geräumt. Nach Einarbeitung der aus der Vorabbefragung gewonnenen Erkenntnisse wurden daran anschließend bundesweit die eigentlichen Daten erhoben. Nach Abschluss der Umfrage folgte die Datenaufbereitung, die daran anknüpfende Auswertung sowie die Interpretation der aus der Online-Umfrage gewonnenen Daten. Bevor jedoch alle diese Schritte durchgeführt werden konnten, musste vorab entschieden werden, ob eine Online-Befragung für die Datenerhebung überhaupt die geeignete Wahl darstellt (vgl. Wagner & Hering 2014, S. 662). Dies wurde anhand ihrer Vor- und Nachteile gegenüber alternativen Befragungsmodi abgewogen. Die entsprechende damit einhergehende Diskussion ist im nachfolgenden Abschnitt mit Bezug auf die Inhalte des Forschungsvorhabens aufgeführt.

Bestimmung der Untersuchungsform: Vor- und Nachteile einer Online-Umfrage

Da der Fragebogen als quantitatives Erhebungsmittel oft ein Sammelausdruck für vielfältige Formen schriftlicher Befragungsmethoden in unterschiedlichen Bereichen darstellt (vgl. Moosbrugger & Kelava 2012, S. 2), wird nachfolgend konkretisiert, wie er im Rahmen des Forschungsvorhabens zu verstehen ist, und wie er im Hinblick auf den Erkenntnisgewinn verwendet wurde.

Per Definition können Fragebögen als standardisierte Zusammenstellungen von Fragen aufgefasst werden, die von verschiedenen Personen zu beantworten sind (vgl. Porst 2014, S. 16). Ziel einer Erhebung quantitativer Daten ist es, empirisch gewonnene Antworten zur Überprüfung der theoretischen Konzepte und Zusammenhänge zu verwenden (vgl. ebd.). In den meisten Fällen stellt ein Fragebogen – z. B. aufgrund der vielen möglichen und nur bedingt planbaren Einflussfaktoren – jedoch ein recht komplexes und nicht einfach zu erstellendes wissenschaftliches Produkt dar (vgl. Butz et al. 2009, S. 158; Porst 2014, S. 189).

Bevor nachfolgend auf den eigentlichen Fragebogen als Online-Erhebungsmittel eingegangen wird, sind zuvor wesentliche Vorteile schriftlicher Befragungen gegenüber telefonischen bzw. persönlich-mündlichen Interviews dargelegt. So spielt bei der Methodewahl vordergründig nicht nur die zeitlich und räumlich positiv zu bewertende Unabhängigkeit eine wesentliche Rolle, auch der mit der Organisation und Vorbereitung geringere Personalaufwand bzgl. Zeit- und Kosten spricht häufig für schriftliche Befragungen (vgl. Sonntag et al. 2012, S. 83; Lissmann 2013, S. 96; Wagner & Hering 2014, S. 662). Hinzu kommt, dass es im Gegensatz zu persönlichen Befragungsmethoden keinen *Interviewer-Effekt* gibt, da ein direkter Einfluss auf die Befragten entfällt und mögliche systematische Fehler, die ggf. durch persönliche Kontakte zwischen Interviewer und Befragtem entstehen, keinen negativen Einfluss ausüben können (vgl. Sonntag et al. 2012, S. 83; Lissmann 2013, S. 97). Neben der für die Interviewten vorteilhaften Anonymität stellt auch die frei wählbare Zeit, die für die Beantwortung genommen werden kann, einen weiteren wichtigen Punkt für die Wahl schriftlicher Befragungen dar (vgl. Sonntag et al. 2012, S. 83; Lissmann 2013, S. 97).

Als Nachteil schriftlicher Fragebögen kann festgehalten werden, dass die Verständlichkeit der Fragen – unabhängig davon, ob die Untersuchungen papierbasiert oder online ablaufen – nur bedingt beeinflusst werden kann. Im besten Fall sollten die Fragen so formuliert sein, dass sie von den zu befragenden Personen zweifelsfrei verstanden werden können (vgl. Atteslander 2010, S. 147). Da die Befragungssituation kaum kontrollierbar ist, lässt das starre Antwortschema i. d. R. keine weiteren individuellen Antwortvarianten zu, die der Situation der Befragten möglicherweise besser entsprechen würden (vgl. Atteslander 2010, S. 147; Sonntag et al. 2012, S. 84). Auch ein Nachfragen bei Nicht-Verstehen der Fragebogeninhalte ist von Seiten der Befragten nicht möglich (vgl. Lissmann 2013, S. 97). Damit einher geht auch das sog. *Missing-Data-Problem*: über das Auslassen von Fragen ist nichts bekannt, weil auch die Forscherinnen und Forscher nicht nachfragen können (vgl. Sonntag et al. 2012, S. 83; Lissmann 2013, S. 97). Weiterhin kann die auch als Vorteil zu betrachtende anonyme Beantwortung der Fragen als Nachteil ausgelegt werden. So ist es bspw. nicht auszuschließen, dass Dritte mitlesen oder sogar Einfluss auf die Befragten nehmen könnten (vgl. Atteslander 2010, S. 147; Lissmann 2013, S. 100). Einer der größten Nachteile einer schriftlichen und postalischen Befragung ist jedoch die geringe Rücklaufquote, die ungefähr zwischen 5 % und 30 % liegt (vgl. Becker & Spöttl 2008, S. 96; Sonntag et al. 2012, S. 83; Lissmann 2013, S. 97).

Um mit den hier kurz aufgeführten Aspekten und Unsicherheiten eine Verzerrung der Ergebnisse zu umgehen, wurde sich im Rahmen des Forschungsvorhabens für eine Online-Umfrage entschieden. Bei einem entsprechenden digitalen Fragebogen handelt es sich genau genommen um eine Variante des schriftlichen Fragebogens, wobei dessen Bearbeitung ausschließlich über ein technisches Medium erfolgt (vgl. Reinecke 2014, S.610). Dabei ist in erster Linie sicherzustellen, dass die gewünschte Zielgruppe überhaupt online erreichbar ist (vgl. Wagner & Hering 2014, S. 663). Aufgrund der Zugänglichkeit von Adressen der Bauunternehmen über die Online-Portale der jeweiligen Handwerkskammern stellt sich dieses Problem innerhalb des Forschungsvorhabens nicht. So konnten die E-Mail-Adressen der angeschriebenen Betriebe über die Handwerksrollen auf den Internetseiten der Handwerkskammern ausfindig gemacht werden.

Ein großer Vorteil von Online-Erhebungen liegt in erster Linie bei dem damit verbundenen geringen finanziellen Aufwand (vgl. Lissmann 2013, S. 100; Wagner & Hering 2014, S. 663). Da kein Interviewer vor Ort sein muss, können die Befragten aufgrund der räumlichen und zeitlichen Unabhängigkeit, sowie über große Entfernungen und Grenzen hinweg simultan kontaktiert werden (vgl. Lissmann 2013, S. 100; Wagner & Hering 2014, S. 662). Durch die Versendung der Fragebögen über das Internet entstehen somit nicht nur große Stichproben, auch sind die Ergebnisse der Umfragen mithilfe entsprechender Auswertungsprogramme zeitnah einsehbar (vgl. Lissmann 2013, S. 100; Wagner & Hering 2014, S. 668). Damit einher geht ebenfalls eine enorme nachgelagerte Zeitersparnis, da durch die Verwendung entsprechender Software ein aufwendiges und fehleranfälliges Übertragen von Daten entfällt (vgl. Sonntag et al. 2012, S. 83; Lissmann 2013, S. 100). Neben der einfachen Auswertung bietet auch die transparente Nachvollziehbarkeit eines solchen Verfahrens einen weiteren Vorteil (vgl. Lissmann 2013, S. 100). Als Nachteil eines Online-Fragebogens muss festgehalten werden, dass nicht kontrolliert werden kann, wer die Fragen beantwortet hat (vgl. ebd.). Dies wurde bei der Erstellung des Fragebogens durch das Auffordern der Befragten nach Angabe der Position im jeweiligen angeschriebenen Unternehmen ausgeräumt.

Durch die Befragung über das Internet müssen datenschutzrechtliche Belange berücksichtigt werden, damit Anonymität und Privatsphäre der Unternehmen sichergestellt sind (vgl. Becker & Spöttl 2008, S. 98; Wagner & Hering 2014, S. 670). Um einem Missbrauch der Informationen vorzubeugen, wurden die Adressdaten der jeweiligen Betriebe von allen übrigen Angaben getrennt abgespeichert. Eine Identifikationsnummer und ein dafür notwendiges Entschlüsselungsprogramm waren nicht erforderlich, da durch die Verwendung des Programms *LimeSurvey* die Daten nicht den Bauunternehmen zugeordnet werden konnten (vgl. Becker & Spöttl 2008, S. 98; Wagner & Hering 2014, S. 670). Ein obligatorischer Hinweis auf den Datenschutz wurde im Anschreiben an die Bauunternehmen berücksichtigt (vgl. Porst 2014, S. 36).¹

¹Das Anschreiben kann dem Anhang entnommen werden.

Verwendung verschiedener Fragetypen und Skalenniveaus

Fragetypen können übergeordnet in geschlossene, offene und stellenweise auch halb-offene Fragen kategorisiert werden (vgl. Petersen 2014, S. 100; Porst 2014, S. 53; Handl & Kuhlenkasper 2018, S. 6). Insbesondere dann, wenn eine Grundmenge möglicher Antworten bekannt ist, werden geschlossene Fragen – bei denen alle relevanten Antworten vorgegeben sind – herangezogen (vgl. Atteslander 2010, S. 146; Kirchhoff et al. 2010, S. 20; Porst 2014, S. 53 und S. 66; Handl & Kuhlenkasper 2018, S. 6). Durch eine entsprechend festgelegte Einheitlichkeit der Antworten wird nicht nur eine Vergleichbarkeit ermöglicht, sondern auch eine statistische Auswertung erleichtert (vgl. Atteslander 2010, S. 148; Porst 2014, S. 55; Handl & Kuhlenkasper 2018, S. 6). Ein Nachteil bei der Verwendung geschlossener Fragen ist der *Nonresponse-Effekt* (vgl. Porst 2014, S. 55). Forscherinnen und Forscher können bei Nicht-Beantwortung einer Frage weder auf die Gründe dafür schließen, noch bewusste Falschangaben oder willkürliche Antworten erkennen (vgl. ebd.).

Um entsprechende negative Effekte zu vermeiden bietet sich die Verwendung offener Fragen an. Bei diesen finden sich für den Befragten keine Antwortkategorien, so dass die Probanden eigene Worte finden müssen (vgl. Atteslander 2010, S. 146; Porst 2014, S. 29 und S. 56; Handl & Kuhlenkasper 2018, S. 6). Ein damit einhergehender großer Nachteil ist jedoch die Vielfalt an Antworten, die man erhält, was eine statistische Auswertung sehr aufwendig und stellenweise auch nicht möglich macht (vgl. Handl & Kuhlenkasper 2018, S. 6). Als Zwischenlösung können halboffene Fragen herangezogen werden. Dies ist bspw. dann sinnvoll, wenn die tatsächliche Grundmenge möglicher Antworten auf eine Frage zwar gut abgeschätzt, aber nicht definitiv bestimmt werden kann (vgl. Porst 2014, S. 59). Hier besitzt der Befragte die Möglichkeit, eine Antwort zu geben, die nicht unter den Vorgaben zu finden ist (vgl. Handl & Kuhlenkasper 2018, S. 6).

Weiterhin kann bei der Kategorisierung von Fragetypen zwischen Einstellungsfragen, Faktfragen, Verhaltensfragen, Wissensfragen und Motivfragen unterschieden werden (vgl. Petersen 2014, S. 87). Da es sich bei der Online-Umfrage im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens um die Ermittlung eines Status quo handelt, sind überwiegend Faktfragen herangezogen worden, die weder Filter-, noch Selektionsfragen darstellen (vgl. Atteslander 2010, S. 148; Kirchhoff et al. 2010, S. 20; Petersen 2014, S. 97). Wichtig im Hinblick auf den erstellten Fragebogen ist jedoch eine Einteilung der Fragen mit Ein- bzw. Mehrfachnennung (vgl. Porst 2014, S. 53). So finden sich bei vier der neun Fragen Mehrfachantworten. Ein entsprechender Hinweis wurde bei den jeweiligen Fragen mit dem Satz „Mehrfachantworten sind möglich.“ vorgenommen (vgl. ebd., S. 54). Überwiegend handelt es sich also, wie bereits angedeutet, um Faktfragen, bei denen die Antworten geschlossen vorgegeben waren. Lediglich zwei Fragen des Fragebogens wurden halboffen entwickelt und nur bei der letzten Frage konnten die Befragten weitere ergänzende Anmerkungen mit eigenen Worten vornehmen. Die Entwicklung des Online-Fragebogens ist in Abschnitt 5.2 zu finden.²

²Der komplette Fragebogen kann dem Anhang entnommen werden.

Bei der Erstellung von Fragebögen ist es neben der Festlegung von Fragetypen ebenfalls wichtig zu berücksichtigen, welche Skala für einen optimalen Erkenntnisgewinn zum Einsatz kommen könnte (vgl. Porst 2014, S. 79). Alle möglichen Skalen haben dabei gemeinsam, dass mit ihrer Hilfe versucht wird, Intensitäten oder Abstufungen unterschiedlicher Meinungen zu erfassen (vgl. Petersen 2014, S. 133). Neben einer richtigen Benennung von Skalenpunkten ist es dabei ebenfalls überaus relevant, dass Art und Struktur der Skala bei der Entwicklung mit einbezogen werden (vgl. Porst 2014, S. 79). So ist es sinnvoll sich frühzeitig über eine mögliche Verbalisierung der Antwortmöglichkeiten Gedanken zu machen. Beispielsweise können alle Skalenpunkte, oder aber auch nur deren Endpunkte verbalisiert werden. Innerhalb der durchgeführten Online-Umfrage handelt es sich bei den Fragen 7 und 8 um verbalisierte Fragen, da dort die Antworten im Rahmen eines festgelegten Bereichs „von bis“, also einer Skala, angegeben werden können. Solche *Likert-Skalen* bieten sich insbesondere für schriftliche bzw. für die im vorliegenden Forschungsvorhaben durchgeführte Online-Umfrage an (vgl. Petersen 2014, S. 138-139; Porst 2014, S. 95). Mit Likert-Skalen einhergehend stellt sich häufig auch die Frage nach einer geraden oder ungeraden Anzahl von Skalenpunkten (vgl. Petersen 2014, S. 146; Porst 2014, S. 79). Dies musste während der Entwicklung bei den Fragen 7 und 8 berücksichtigt werden, da es sich dort um ein Spektrum handelte, bei dem die Befragten angeben mussten, wie häufig sie Software-Applikationen im Baustellenbetrieb nutzen und wann sie ggf. gedenken sich weitere digitale Arbeitsmittel anzuschaffen.

Skalen können unterschiedliche Niveaus aufweisen. Übergeordnet ist dabei eine Kategorisierung zwischen *Nominal-Skalen*, *Ordinal-Skalen*, *Intervall-Skalen* und *Ratio-Skalen* möglich (vgl. Petersen 2014, S. 133; Porst 2014, S. 71). Verwendet man nominale Datenniveaus, so gibt es keine Abstufungen, sondern nur die Frage, ob etwas zutrifft oder nicht. Eine solche Form kommt in der durchgeführten Online-Umfrage nicht vor. Auch das Intervall-Datenniveau und das rationale Datenniveau, bei denen die Abstände zwischen den Skalenstufen gleich groß sind bzw. darüber hinaus mit einem exakten Nullpunkt versehen werden, wurden nicht herangezogen (vgl. Petersen 2014, S. 136). Lediglich das ordinale Datenniveau fand Anwendung. Bei solchen Antwortmöglichkeiten stehen die Ausprägungen in einer relationalen Beziehung zueinander, so dass sie damit einer Rangordnung unterliegen (vgl. Porst 2014, S. 73). Dies betrifft im Fragebogen ebenfalls die Fragen 7 und 8. Auch wenn die vorgegebenen Antworten mathematisch nicht eindeutig berechenbar sind (vgl. Petersen 2014, S. 135), stellt das ordinale Messniveau eine gute Möglichkeit dar, um einen erweiterten Überblick an die zuvor in Kapitel 2 dargestellte Sektoranalyse zu erlangen. Da die restlichen Fragen (Fragen 1 bis 6) keine Relationen unter den Antwortmöglichkeiten aufweisen und auch kein bipolares Verhältnis vorgegeben wurde, handelt es sich bei diesen um Fragen ohne Skalenbezug.

Repräsentativität der Umfrage: Grundgesamtheit und Stichproben

Nach der Bestimmung der Untersuchungsform wird im vorliegenden Abschnitt der für die Online-Umfrage relevante Erhebungsbereich definiert (vgl. Stein 2014, S. 146). Die für eine entsprechende explorative Untersuchung notwendige Grundgesamtheit, also die Menge, über die Aussagen getroffen werden sollen, muss im Hinblick auf eine kohärente und verifizierbare Analyse exakt definiert sein (vgl. von der Heyde 2014, S. 25; Stein 2014, S. 146; Handl & Kuhlenkasper 2018, S. 305). Damit die im Rahmen der Befragung ausgewählten *Stichproben* die Grundgesamtheit adäquat wiedergeben, wird in Anlehnung an von der Heyde (2014) eine genaue Definition vorgenommen (vgl. ebd., S. 25-27).³ Durch die Berücksichtigung dieser übergeordneten Aspekte wird sichergestellt, dass die Beschreibung der Grundgesamtheit auch tatsächlich am Ziel der jeweiligen Erhebung orientiert ist (vgl. ebd., S. 26).

Im Rahmen der Erhebung wird der räumliche Definitionsteil durch die Grenzen der Bundesrepublik Deutschland festgelegt. Da die in Kapitel 3 dargestellten Auswirkungen der Digitalisierung nicht an politischen Grenzen halt machen, ist eine Unterscheidung nach Bundesländern wenig sinnvoll.⁴ Darüber hinaus kann bei einer bundesweiten Grundgesamtheit eine größere Anzahl an Bauunternehmen herangezogen werden. Mit einer entsprechenden Festlegung der Befragung von Betrieben geht auch das zweite Definitionselement einher. Dieses beinhaltet im vorliegenden Forschungsprojekt die jeweiligen Akteurinnen und Akteure der einzelnen Unternehmen (vgl. ebd.). Ein weiterer Aspekt, die zeitliche Festlegung der Erhebung, ist trotz saisonal zu berücksichtigender Faktoren im Bauwesen nur marginal in Betracht zu ziehen. Denn auch wenn Bauarbeitsprozesse unter sich jahreszeitlich ändernden Bedingungen betrachtet werden müssen, sind zeitliche Aspekte im Rahmen der Befragung im Hinblick auf die Auswahl von Unternehmen nur von untergeordneter Bedeutung.⁵ Ein weiterer wichtiger Definitionsteil ist die Auswahlgrundlage (vgl. ebd., S. 27). Diese wird im Rahmen des Forschungsvorhabens durch die Handwerksrollen der jeweiligen Bundesländer abgedeckt. Bei allen befragten Unternehmen handelt es sich durch die Zugehörigkeit in den jeweiligen Listen um eingetragene Fachbetriebe.

Da aus Kosten- und Zeitgründen Voll- oder Totalerhebungen – bei denen zwar alle forschungsrelevanten Einheiten erfasst würden – i. d. R. nicht realisierbar sind (vgl. Kirchhoff et al. 2010, S. 15; Loeffler & von der Heyde 2014, S. 19; Stein 2014, S. 146; Handl & Kuhlenkasper 2018, S. 8 und S. 306), wird für die durchgeführte Befragung innerhalb des Forschungsvorhabens nur ein Teil der Grundgesamtheit in Betracht gezogen. Es handelt sich somit um eine Teilerhebung (vgl. Stein 2014, S. 146; Handl & Kuhlenkasper 2018, S. 8 und S. 306). Erfolgt eine solche Erhebung nach festen Regeln, so wird die

³Der Begriff *Stichprobe* wird im weiteren Verlauf des vorliegenden Abschnitts genauer erläutert.

⁴Auch eine internationale Erhebung wäre denkbar. Da die aus der Umfrage gewonnenen Erkenntnisse sich jedoch auf deutsche Verhältnisse beziehen, werden diesbezüglich nur nationale Bauunternehmen befragt.

⁵Aspekte der Witterung wurden in Abschnitt 3.4: *Effekte der Digitalisierung auf baustellenspezifische Besonderheiten* behandelt.

herangezogene Teilgesamtheit unter wissenschaftlichen Gesichtspunkten auch als *Stichprobe* aufgefasst (Stein 2014, S. 146; Handl & Kuhlenkasper 2018, S. 305). Das Ziel einer jeden Stichprobenerhebung ist es, aus den bei einer ausgewählten Menge von Befragten gewonnenen Informationen auf die analogen Gegebenheiten in der Grundgesamtheit zu schließen bzw. auf diese hochzurechnen (vgl. Lamnek 2010, S. 680; von der Heyde 2014, S. 30). Stichproben sollen mithilfe eines solchen Vorgehens ein möglichst getreues Abbild der Grundgesamtheit schaffen (vgl. Kirchhoff et al. 2010, S. 15). Letztendlich können sie aber nur *ein* mögliches Abbild im Rahmen einer Befragung ermöglichen und daher keine hundertprozentige Wiedergabe der Realität darstellen (vgl. von der Heyde 2014, S. 31). Die innerhalb des Stichprobenumfangs ausgewählten Elemente liefern somit lediglich Schätzwerte für die Gegebenheiten in der Grundgesamtheit, so dass sie die gesuchten wahren Werte nur selten exakt treffen bzw. zufällig um diese Werte streuen (vgl. von der Heyde 2014, S. 31).

Um eine Auswahl der Einheiten innerhalb der Grundgesamtheit zu treffen, kommen mehrere Verfahren in Frage. Übergeordnet kann zwischen zufälligen und nicht zufälligen Auswahlverfahren unterschieden werden (vgl. Loeffler & von der Heyde 2014, S. 20; Stein 2014, S. 146). In Anlehnung an diese beiden Betrachtungsweisen handelt es sich im vorliegenden Forschungsvorhaben um ein hybrides Auslesekonzept. So wird eine zufällige Auswahl von Bauunternehmen im Rahmen einer nicht willkürlichen Staffelungsmethode durchgeführt (vgl. Loeffler & von der Heyde 2014, S. 20). Eine bewusste Auswahl erfolgte zuerst übergeordnet durch eine Selektion von Gewerken in den jeweiligen Handwerksrollen. So wurden vordergründig Kategorien gesichtet, die insbesondere massivbauorientierte Handwerksbetriebe aufführen. Nach Separierung dieser Unternehmen von anderen Gewerken wurde die Auswahl der Betriebe zufällig getroffen.⁶

Mithilfe des beschriebenen Vorgehens hat im Rahmen der Online-Umfrage jeder Handwerksbetrieb – also jede statistische Einheit – dieselbe Chance, in die Stichprobe aufgenommen zu werden (vgl. Kirchhoff et al. 2010, S. 15; Häder & Häder 2014, S. 285; Stein 2014, S. 146-147). Durch das hier aufgeführte Heranziehen von Stichproben innerhalb entsprechender Zufallsauswahlen wird durch eine Generalisierung der Stichprobenergebnisse ein getreues Abbild der Grundgesamtheit erreicht (vgl. Kirchhoff et al. 2010, S. 15; Stein 2014, S. 146). Abb. 5.2 veranschaulicht die Stichprobenbeziehung innerhalb der Online-Befragung und stellt schematisch das zuvor beschriebene Vorgehen dar.

⁶Eine Einteilung nach Maurer- und Betonbauunternehmen findet sich auch in den Online-Portalen der Handwerkskammern wieder, so dass eine Separierung auf diese beiden Berufe sinnvoll ist. Um einer subjektiven Auswahl vorzubeugen wurden die einzelnen Bauunternehmen ebenfalls unter zufälligen Gesichtspunkten ausgewählt.

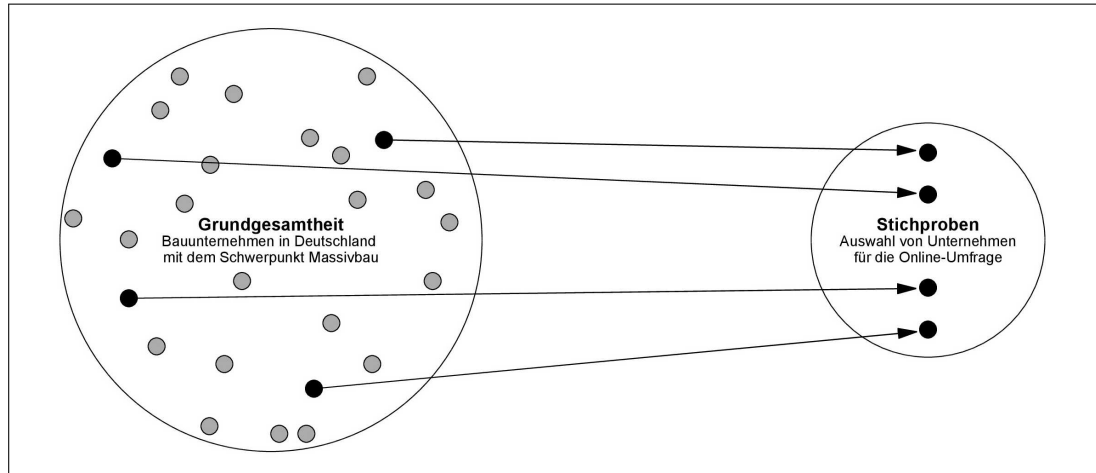


Abb. 5.2: Grundgesamtheit und Stichprobe im Rahmen der Online-Umfrage (eigene Darstellung in Anlehnung an Handl & Kuhlenkasper (2018, S. 306))

Da nach einem Versenden der E-Mails an die Bauunternehmen nicht mehr nachvollzogen werden konnte, wer in den jeweiligen Betrieben die Fragen beantwortet hat, ist mithilfe einer Aussage, in der nach der Position der Teilnehmerin bzw. des Teilnehmers gefragt wurde, eine spätere Zuordnung der gemachten Angaben sichergestellt worden. Die Befragten hatten die Möglichkeit anzukreuzen, in welchem Bereich sie im Unternehmen tätig sind.⁷ Dadurch konnten innerhalb der zufällig zustande gekommenen Stichproben die Antworten strukturiert ausgewertet werden.

Um zu überprüfen, ob die gewonnene Teilmenge die Ergebnisse der durchgeführten Online-Umfrage auch wirklichkeitsnah abbildet, sind Untersuchungen der Stichproben auf ihre Repräsentativität hin unerlässlich (vgl. Atteslander 2010, S. 66; von der Heyde 2014, S. 29; Petersen 2014, S. 20). Eine Stichprobe ist genau dann repräsentativ, wenn sie hinsichtlich ihrer Zusammensetzung die jeweilige Grundgesamtheit möglichst genau widerspiegelt (vgl. Becker & Spöttl 2008, S. 200; Moosbrugger & Kelava 2012, S. 426; von der Heyde 2014, S. 30). Auch wenn eine Überprüfung der Repräsentativität einer Stichprobe nur sehr eingeschränkt möglich ist (vgl. von der Heyde 2014, S. 30), wurde im Rahmen der Online-Umfrage durch übergeordnete Maßnahmen versucht ein möglichst realitätsnahes Abbild zu erzielen. So ist neben der bereits zuvor erwähnten Zufallsauswahl eine größtmögliche Anzahl an Unternehmen für die Umfrage angeschrieben worden (vgl. Atteslander 2010, S. 66; Häder & Häder 2014, S. 286).

⁷Es handelt sich bei dieser Aussage um die Frage 3, bei der folgende Antwortmöglichkeiten bereit standen: Geschäftsführung, Baufacharbeit (z. B. Polier, Maurer oder Stahlbetonbauer), Planung (z. B. Bauingenieur oder Architekt), Verwaltung (z. B. Bürofachkraft oder im Sekretariat) oder in einem anderen Bereich.

Einen weiteren Störbereich für eine wirklichkeitsgetreue und nachvollziehbare Repräsentativität stellt die Erhebungsart selbst dar (vgl. ebd.). Durch die durchgeführte reflexive Erstellung des Fragebogens und durch den daran anknüpfenden Pretest wurde jedoch sichergestellt, dass die Ergebnisse so gut wie möglich ein Abbild der Grundgesamtheit darstellen. Auch die Kombination der Fragenblöcke (s. Abschnitt 5.2) sorgt dafür, dass die gewonnenen Erkenntnisse realitätsnah abgebildet werden können. So ist bspw. nicht nur eine Zuordnung der digitalen Geräte dem jeweiligen Tätigkeitsbereich im Rohbau, sondern auch zur Unternehmensgröße der befragten Firmen möglich.⁸ Auch die Reliabilität der Online-Umfrage wird durch die ausführliche Vorbereitung und den Pretest sichergestellt. Durch die potenzielle Verwendung der Fragen zu anderen Zeitpunkten mit anderen Unternehmen ist zudem eine damit einhergehende Zuverlässigkeit und Genauigkeit abgedeckt, da die Erhebung auf die gleichen Inhalte ausgerichtet ist und sich lediglich der Befragungszeitraum ändert (vgl. Atteslander 2010, S. 6; Becker & Spöttl 2008, S. 200; Krebs & Menold 2014, S. 427).⁹

Verwendetes Online-Befragungstool

Für die Durchführung der Online-Umfrage musste sich im Vorfeld der Untersuchungen für eine entsprechende Software entschieden werden. An der *Technischen Universität Hamburg* stehen – wie es an den meisten Universitäten auch der Fall ist (vgl. Wagner & Hering 2014, S. 669) – nicht-kommerzielle Campus-Lizenzen diverser Programme zur Verfügung. Für die Befragung im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde das an der TUHH vorhandene Programm *LimeSurvey* verwendet.¹⁰ Die Software stellt die notwendigen Anwendungsmöglichkeiten für die Online-Umfrage bereit. Neben einem Interface für der Fragebogenprogrammierung bietet *LimeSurvey* auch eine Teilnehmerverwaltung sowie sichere Datenverwaltungsmodalitäten an (vgl. ebd.).

⁸Dies betrifft die Fragen 1 und 2 des Fragebogens.

⁹Auch wenn per se nicht davon ausgegangen werden kann, dass bei einer weiteren Befragung genau die gleichen Ergebnisse erzielt werden, wird dennoch angenommen, dass eine Befragung unter ähnlichen Bedingungen auch zu ähnlichen Daten führen würde.

¹⁰Es wurden auch andere Programme in Erwägung gezogen, z. B. *Google Formulare*, *SoSci Survey* oder *Survio*. Aufgrund der direkten Verfügbarkeit und auch bzgl. des professionellen Supports an der TUHH wurde jedoch das vorhandene Programm *LimeSurvey* verwendet. Dadurch konnte nicht nur eine unmittelbare Anwendung erfolgen, auch datenschutzrechtliche Belange wurden somit abgedeckt.

5.2 Fragebogendesign: Entwicklung der Online-Umfrage

Anknüpfend an die wissenschaftlichen Grundlagen zur Erstellung des Fragebogens wird im vorliegenden Abschnitt dargelegt, welche Inhalte in der Online-Umfrage berücksichtigt wurden, aber auch welche Aspekte bei der Erhebung des Status quo keine Rolle gespielt haben. An eine kurze Beschreibung zum Umfang des Fragebogens folgen anschließend Erläuterungen wesentlicher Elemente, die bei der Anfertigung der einzelnen Fragen herangezogen wurden. Insgesamt betrifft dies zehn Grundsätze, die u. a. Aspekte zur Formulierung und zum Ausdruck berücksichtigten, damit ein grundlegendes und intersubjektives Verständnis beim Ausfüllen des Fragebogens auf Seiten der Teilnehmerinnen und Teilnehmer ermöglicht werden konnte. Nach einer mit den Fachbegriffen einhergehenden Berücksichtigung der Reihenfolge einzelner Fragen werden die Thesen, die zur Anfertigung des Fragebogens geführt haben, diskutiert und anschließend für die Standardisierung auf einzelne thematisch zusammenhängende Blöcke übertragen. Anknüpfend daran wird erläutert, welche Bauunternehmen für die Online-Umfrage angeschrieben wurden. Der vorliegende Abschnitt schließt mit relevanten Aspekten, die in den jeweiligen E-Mail-Texten für die Betriebe berücksichtigt wurden, bevor im folgenden Abschnitt 5.3 der Pretest und die durchgeführte Erhebung thematisiert werden.

Umfang des Online-Fragebogens

Um eine objektive und klare Auswertung der gewonnenen Erkenntnisse sicherzustellen, und um einen möglichst großen Rücklauf zu erzielen, wurde der Zeitaufwand zur Beantwortung der Online-Umfrage mit wenigen und präzise gestellten Fragen möglichst gering gehalten (vgl. Becker & Spöttl 2008, S. 98; Kirchhoff et al. 2010, S. 113 Sonntag et al. 2012, S. 84; Petersen 2014, S. S. 36 und S. 81). Da Befragungspersonen erst bei einer größeren Anzahl von Antwortmöglichkeiten verstärkt dazu tendieren, entweder die vorangestellten Antwortoptionen oder die zuletzt präsentierte Kategorien auszuwählen, wurden aufgrund der geringen Antwortvorgaben ebenfalls sog. *Primacy-* bzw. *Recency-Effekte*, bei denen entsprechende Phänomene auftreten, für die Umfrage ausgeschlossen (vgl. Petersen 2014, S. 179; Porst 2014, S. 138).¹¹ Auch waren infolge der Vorgabe präzise formulierter Antworten weder Filter erforderlich, noch Bestand die Gefahr einer Monotonie beim Ausfüllen des Fragebogens (vgl. Petersen 2014, S. 72; Porst 2014, S. 155-160). Da der Umfang für die Teilnehmerinnen und Teilnehmer so gering wie möglich gehalten werden sollte, entfielen darüber hinaus nicht nur den Fragen vorangestellte schriftliche Einleitungen, sondern ebenfalls zusätzliche Regieanweisungen zu den einzelnen Fragen. Da es sich wie zuvor in Abschnitt 5.1 beschrieben, überwiegend um Faktfragen – und nicht um komplexe Zusammenhänge – handelt, konnten entsprechende Einweisungen entfallen (vgl. Petersen 2014, S. 283). Faktoren auf Seiten der Befragten wurden im Hinblick auf die Formulierung der Fragen und der Antworten hingegen berücksichtigt. Diese werden im nachfolgenden Abschnitt ausführlicher dargestellt.

¹¹Frage 6 weist insgesamt 15 Antwortmöglichkeiten auf, die jedoch alle schnell überblickt werden können.

Frageformulierungen, Sprachstil und Umgang mit Fachtermini

Um neben der verbesserten Aussagefähigkeit des Fragebogens auch eine ausreichende Datenbasis zu erlangen, wurden die Fragen – und auch die Antwortvorgaben – so formuliert, dass sie möglichst allen Teilnehmerinnen und Teilnehmern ohne zusätzlichen kognitiven Aufwand verständlich erscheinen (vgl. Becker & Spöttl 2008, S. 98; Butz et al. 2009, S. 157; Kirchhoff et al. 2010, S. 21; Petersen 2014, S. 115; Porst 2014, S. 19). Im Zuge des Forschungsvorhabens entstanden die Fragen dabei zuerst stichwortartig, bevor sie im weiteren Verlauf nach und nach weiter ausgebaut wurden, um die vielen Aspekte, die bereits in den vorangegangenen Kapiteln behandelt wurden, abzudecken (vgl. Petersen 2014, S. 26). Um sicherzugehen, dass darüber hinaus nicht an der Realität vorbei gefragt wurde, und um zusätzlich reliable Aussagen im Rahmen der Erhebung zu erhalten, sind die entsprechenden Fragen so formuliert worden, dass sie mögliche gedankliche Kategorien der Befragten widerspiegeln (vgl. Petersen 2014, S. 55 und S. 149). Als Grundlage wurde sich dabei – neben den Erkenntnissen aus dem durchgeführten Pretest – in erster Linie an den zehn Geboten der Frageformulierung nach Porst (2014, S. 99-100) orientiert:

1. Verwendung einfacher Begriffe:

Da sich Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler im Rahmen ihrer Forschung intensiv mit dem jeweiligen Untersuchungsgegenstand beschäftigt haben, die Befragten in aller Regel aber nicht, ist es wichtig zu berücksichtigen, dass Fragen so formuliert werden, dass sie intersubjektiv verstanden werden können (vgl. Kirchhoff et al. 2010, S. 21; Petersen 2014, S. 54; Porst 2014, S. 21 und S. 100). Im Zuge der Erstellung des Fragebogens wurde bei der Verwendung von Begriffen daher auf klare Formulierungen geachtet. Dies galt auch für das Anschreiben in den versendeten E-Mails.¹² Im Kontext des bereits angesprochenen semantischen Verständnisses konnten jedoch für einige neue Begriffe, die im Rahmen der Digitalisierung von Bedeutung sind, nur bedingt andere Termini herangezogen werden. So ist es bspw. zwar möglich den häufig eher nicht geläufigen Ausdruck *Additive Fertigung* durch das etwas gebräuchlichere Wort *3D-Druck* zu ersetzen, bei Begriffen wie *Augmented Reality* ist dies aber wiederum nicht möglich. Sind bei der Erhebung Fragen im Hinblick auf diese Effekte nicht beantwortet bzw. vorgegebene Antwortmöglichkeiten nicht ausgewählt worden, wurde in entsprechenden Fällen davon ausgegangen, dass, wenn Begriffe auf Seiten der Befragten nicht bekannt waren, die jeweiligen Technologien im Bauunternehmen auch nicht eingesetzt werden (vgl. Porst 2014, S. 21). Trotz Berücksichtigung einer auf die Zielgruppe hin ausgerichtete Sprache, wurde eine gendergerechte Schreibweise nicht eingesetzt, da sie, obwohl sie korrekterweise alle Personen ansprechen würde, der gewünschten prägnanten Darstellung der Fragen widerspricht. Zudem bewegt sich die befragte Personengruppe nicht in einem Umfeld, in dem normalerweise auf eine gendergerechte Schreibweise geachtet wird, so dass entsprechende Maßnahmen – bei einer darüber hinaus eher maskulinen Teilnehmergruppe – mehr Verwirrung als Klarheit stiften.

¹²Aspekte zum Anschreiben werden im weiteren Verlauf des vorliegenden Abschnitts noch genauer erläutert. Das versendete Anschreiben kann dem Anhang entnommen werden.

2. Vermeidung langer und komplexer Fragen:

Da allgemein formulierte Fragen zu vieldeutigen Interpretationen führen können (vgl. Sonntag et al. 2012, S. 84), wurden alle Texte des Fragebogens so kurz und prägnant wie möglich verfasst. Damit konnten entsprechende Effekte einerseits nicht nur verringert werden, auch wurde den Teilnehmerinnen und Teilnehmern eine direkte Erfassung der Fragen ermöglicht (vgl. Sonntag et al. 2012, S. 84; Porst 2014, S. 21).

3. Vermeidung hypothetischer Fragen:

Hypothetische Aussagen, wie z. B. „Stellen Sie sich vor, Sie würden in Zukunft mit AR-Brillen arbeiten ...“ kommen im Zuge der Erfassung des aktuellen Standes der Digitalisierung auf Baustellen bzw. innerhalb des Fragebogens nicht vor.

4. Vermeidung doppelter Stimuli und Verneinungen:

Da eine Frage stets nur einen einzigen unmissverständlich formulierten Sachverhalt erfragen sollte (vgl. Petersen 2014, S. 115) und Begriffe in den Aussagen nicht mehrdeutig sein dürfen (vgl. Porst 2014, S. 22), wurde bspw. nicht nach Vorgängen auf Baustellen *und* im Büro gefragt. Auch Negationen wurden vermieden, da bei Nutzung entsprechender Aussagen häufig Unklarheiten auftreten können, ob Zustimmung oder Ablehnung gemeint ist (vgl. Sonntag et al. 2012, S. 84).

5. Vermeidung von Unterstellungen und suggestiver Fragen:

Forscherinnen und Forscher entwickeln aufgrund der persönlichen Sichtweise im Rahmen eines Forschungsvorhabens ungewollt subtile Suggestivfragen, die in jedem Falle vermieden werden sollten (vgl. Kirchhoff et al. 2010, S. 21; Sonntag et al. 2012, S. 84; Petersen 2014, S. 266). Im erstellten Fragebogen treten keine suggestiven Fragen und auch keine Unterstellungen auf.

6. Vermeidung von Begriffen aus fremden Fachgebieten:

Da ein Fragebogen die Sprache der teilnehmenden Personen sprechen muss (vgl. Petersen 2014, S. 55), ist es wichtig, dass sich die Fragen an den jeweiligen Zielgruppen orientieren. In Anlehnung an Punkt 1 wurden Termini, über die viele der Befragten mutmaßlich nicht verfügen, weitestgehend vermieden. So sind Fremdwörter und Fachbegriffe bei den Fragen nicht eingebaut worden (vgl. Petersen 2014, S. 56 und S. 60). Bei den Antwortvorgaben sind jedoch neue Begrifflichkeiten aus dem Bereich der Digitalisierung stellenweise unumgänglich. Da Fremdwörter, z. B. *Augmented Reality* oder *RFID*, allerdings nur bei den Ankreuzmöglichkeiten vorgesehen wurden, ist der Effekt eines Nicht-Verstehens auf Seiten der Befragten beim Lesen einer Frage als gering einzustufen.

7. Fragen mit eindeutigen Zeitbezug:

Die Fragen 7 und 8 der Online-Erhebung beinhalten zeitlich bezogene Aspekte. Um einen eindeutigen Bezug herzustellen, wurden die bei den Ankreuzmöglichkeiten auswählbaren Zeiträume präzisiert (vgl. Porst 2014, S. 110). Die Antwortoptionen wurden durch zusätzliche Vorgaben so exakt wie möglich beschrieben, damit für die Befragten ein eindeutiger und sofort erkennbarer Anker vorhanden war (vgl. ebd., S. 111).

8. Verwendung erschöpfender und disjunkter Antwortkategorien:

Dem Gebot der Eindeutigkeit und der Eindimensionalität folgend wurden bei der Entwicklung sämtliche Fragen und Antwortmöglichkeiten überschneidungsfrei erstellt (vgl. Petersen 2014, S. 110). So sind für eindeutige Zuordnungen bspw. die Begriffe *Smartphone* und *Tablet* bei den ankreuzbaren Antwortmöglichkeiten in Frage 6 voneinander getrennt (vgl. Sonntag et al. 2012, S. 84).

9. Sicherstellung des Kontextbezugs einer Frage:

Um unkontrollierte Auswirkungen der Frageformulierungen durch die Befragten zu vermeiden, ist bei jeder Frage darauf geachtet worden, dass ein Kontextbezug auf Seiten der Teilnehmerinnen und Teilnehmer sofort ersichtlich wurde.

10. Definition unklarer Begriffe:

Da abstrakte Begriffe oder Fachvokabular ggf. von den Befragten nicht verstanden werden (vgl. Sonntag et al. 2012, S. 84; Petersen 2014, S. 172), wurde durch zusätzliche Beschreibungen versucht mögliche Unklarheiten auszuräumen. Zur bessern Verständlichkeit sind deshalb bei verschiedenen Antwortmöglichkeiten Ergänzungen in Klammern vorgenommen worden. Dies betrifft bspw. Frage 3, in der danach gefragt wird, in welchem Bereich die Teilnehmer/-innen arbeiten. Hinter der Ankreuzmöglichkeit Facharbeit wurde in Klammern „z. B. als Polier, Maurer oder Stahlbetonbauer“ hinzugefügt. Weiter sind bei den Aufzählungen der digitalen Innovationen zusätzlich bekannte Beispiele bzw. Schlagwörter aufgeführt worden. So erhalten bei Frage 6, die sich explizit auf die Nutzung digitaler Arbeits- und Hilfsmittel bezieht, die dort aufgeführten Antwortmöglichkeiten ergänzende Erläuterungen. Zur Ankreuzmöglichkeit *Laserdistanzmesser* wurde bspw. der Begriff „Distos“ hinzugefügt und der Fachausdruck *Cloud -Lösungen* ist mit dem Zusatz „Datenspeicherungen im Internet“ ergänzt worden. Da umfangreiche zusätzliche Definitionen den Fragebogen nur unnötig verlängern würden, wird vereinfacht davon ausgegangen, dass bei Nicht-Anwählen einer Antwortoption nicht nur der Begriff nicht bekannt ist, sondern dass darüber hinaus auch das jeweilige digitale Werkzeug im befragten Bauunternehmen keine Verwendung findet.

Reihenfolge der Fragen

Da die Fragensukzession einer Erhebung großen Einfluss auf das Antwortverhalten der Befragungspersonen hat (vgl. Butz et al. 2009, S. 176; Porst 2014, S. 138), wurde eine sinnvoll festgelegte Reihenfolge der Fragen vorgenommen.¹³ Im Konzept der Erstellung einer kurzen Umfrage ist auf eine zusätzliche Einstiegsfrage sowie auf weitere dramaturgische Elemente jedoch verzichtet worden (vgl. Porst 2014, S. 140-146). Die erste Frage nach der Verortung der Tätigkeiten des eigenen Bauunternehmens stellt einen einfachen und für die Befragten leicht zu beantwortenden Einstieg dar. Anhand der Fragenblöcke, die im vorliegenden Abschnitt nachfolgend erläutert werden, wird die Sukzession der

¹³Da Sukzessionseffekte häufig nur schwer auszuräumen sind, kann eine perfekte Reihenfolge nur angestrebt werden (vgl. Porst 2014, S. 138).

Fragen ersichtlich. Bei der Berücksichtigung der Reihenfolge war es über eine nachvollziehbare Anordnung jedoch äußerst wichtig, dass die Auskunft nach zukünftigen Anschaffungen am Ende des Fragebogens verortet wurde. Durch die vorher aufgeführten technologischen Neuentwicklungen konnten entsprechende Termini von den Teilnehmerinnen und Teilnehmern als Anker zur Einschätzung zukünftiger Investitionen in ihren Unternehmen herangezogen werden (vgl. Petersen 2014, S. 149).

Thesen für die Online-Umfrage

Die Erkenntnisgewinne, die aufgrund der Online-Umfrage erlangt werden sollen, können übergeordnet anhand von vier Thesen – die sich stellenweise mit den Kernthesen aus Abschnitt 1.1 decken – betrachtet werden:

1. Die Digitalisierung ist v. a. bei kleinen und mittelgroßen Bauunternehmen nicht so stark ausgeprägt, wie es in vielen Fachmedien bereits dargestellt wird.
2. Die Kommunikation auf Baustellen findet hauptsächlich über Telefonate, mithilfe von E-Mails oder über Informationen auf zweidimensionalen Papierplänen statt.
3. Eine Nutzung digitaler und zentraler Gebäudeinformationsmodelle findet nur teilweise bis gar nicht statt.
4. Kleine und mittelgroße Bauunternehmen planen eher langfristig eine Einführung digitaler Baugeräte und Technologien.

Um die Implementierung digitaler Arbeitsmittel auf Baustellen richtig einzuschätzen zu können, wird mit der ersten These bereits auf Grundlage der in den Kapiteln 2 und 3 dargestellten Erkenntnisse angenommen, dass sich die Digitalisierung auf Baustellen erst in einem Anfangsstadium befindet. Die These deckt sich grundlegend mit der ersten Kernthese aus Abschnitt 1.1. Die zweite These im Rahmen der Online-Umfrage zielt auf die Informatisierung ab, die – wie in Abschnitt 4.1 gezeigt – im Rahmen der Digitalisierung wesentliche Änderungen hervorbringen wird. Auch hier gibt es Überschneidungen mit den zuvor aufgestellten Kernthesen. So deckt sich die aufgeführte Aussage mit den Inhalten der Kernthese 3, die besagt, dass sich die Informatisierungsprozesse auf Baustellen grundlegend ändern werden. These 3 greift anknüpfend an These 2 die v. a. für zukünftige Prozesse wichtige Verwendung eines zentralen Bauwerksinformationsmodells auf. Neben der Übersicht über die Nutzung innovativer Geräte und Techniken soll mithilfe von These 4 ein Blick in die Zukunft gerichtet werden, indem die befragten Unternehmen mögliche Anschaffungen digitaler Werkzeuge für ihre Ausführungstätigkeiten einschätzen (vgl. Gensicke et al. 2016, S. 10). Damit ist die Aussage mit der Kernthese 4 verknüpft, die besagt, dass eine Einbindung digitaler Arbeits- und Hilfsmittel eher langsam stattfindet.

Standardisierung des Fragebogens – Einteilung in Fragenblöcke

Auf den zuvor genannten Thesen aufbauend wird nachfolgend die Auswertung der gewonnenen Umfrage-Erkenntnisse standardisiert. Mithilfe einer zuvor festgelegten systematischen Kategorisierung kann sichergestellt werden, dass die gesamte Befragung nicht nur für alle Befragungspersonen möglichst gleichartig abläuft (vgl. Sonntag et al. 2012, S. 83; Petersen 2014, S. 21; Porst 2014, S. 63), sondern auch, dass die gemachten Angaben untereinander im Rahmen der nachgelagerten Sichtung zugeordnet werden können. Dafür sind die bereits zuvor erstellten Thesen übergeordnet in Fragen operationalisiert und zusätzlich in Themenblöcke eingeteilt worden:

Fragenblock 1: Zuordnung (Fragen 1 bis 3)

Um die Angaben der Teilnehmerinnen und Teilnehmer eindeutig zuordnen zu können, ist es unerlässlich grundlegende unternehmensbezogene bzw. betriebsspezifische Angaben der Baufirmen zu erfragen. Die am Anfang der Umfrage erhobenen Erkenntnisse zu Tätigkeitsbereichen, Mitarbeiterzahlen und Positionsverortungen dienen diesbezüglich als Grundlage für die spätere Auswertung, die nur dann sinnvoll und nachvollziehbar ablaufen kann, wenn wesentliche Informationen über die befragten Personen verfügbar sind (vgl. Becker & Spöttl 2008, S. 98; Porst 2014, S. 202). Neben den ersten beiden Fragen, die auf die Verortung der Tätigkeiten und die Unternehmensgröße abzielen, wird in Frage 3 explizit nicht danach gefragt, in welchem Beruf die Teilnehmerinnen und Teilnehmer arbeiten, sondern in welchem Unternehmensbereich. Diese Entscheidung hat im Rahmen der Standardisierung den Vorteil, dass die ermittelten Angaben besser mit den Kommunikationsaspekten verknüpft werden können. Mit der zuvor gestellten Frage nach der Anzahl der Beschäftigten wird abweichend von der Information nach der Gesamtgröße des Unternehmens zusätzlich die tatsächliche Anzahl von Fachkräften auf Baustellen erhoben. Da die Arbeitsprozesse der Fachkräfte im Mittelpunkt stehen, ist eine genaue Verteilung beteiligter Akteurinnen und Akteure an den eigentlichen Bauprozessen vordergründig wichtiger, als eine Kenntnis über die Gesamtgröße der Betriebe. Die Einteilung der Antwortmöglichkeiten erfolgt bei dieser Frage nach der Kategorisierung des *Statistischen Bundesamtes* (vgl. Destatis 2017, S. 7).

Fragenblock 2: Kommunikation (Fragen 4 und 5)

Dieser Block stellt durch die Erhebung der Informatisierungs- und Kommunikationsprozesse auf Baustellen das Herzstück der Befragung dar. Neben den Erkenntnissen, wie projektspezifische Angaben während der Erstellung von Bauwerken vermittelt bzw. wie relevante Informationen geteilt werden, liefern die Fragen 4 und 5 wesentliche Aufschlüsse über den aktuellen Stand zur Digitalisierung auf Baustellen. Die Methode des Building Information Modeling spielt dabei übergeordnet eine wichtige Rolle. Bei den Fragen wird die verbale Kommunikation als Antwortmöglichkeit nicht aufgeführt, da sie auf allen Baustellen vorzufinden ist, und somit voraussichtlich von allen Teilnehmerinnen und Teilnehmern ausgewählt würde. Außerdem ist diese Art der Kommunikation nicht nur schwer dokumentierbar, auch ist davon auszugehen, dass sie sich im Zuge der Digitalisierung nur unwesentlich verändern wird.

Fragenblock 3: Verwendung (Fragen 6 und 7)

Mit Frage 6 wird der aktuelle Stand digitaler Geräte und Techniken ermittelt. Diese Erhebung entspricht einer klassischen Befragung nach der materiellen Ausstattung einer Einrichtung (vgl. Kirchhoff et al. 2010, S. 22). Die Reihenfolge der aufgeführten digitalen Arbeits- und Hilfsmittel in der Frage orientiert sich an der in Abschnitt 2.4 erstellten Kategorisierung technologischer Innovationen. Frage 7 baut indirekt auf der Ermittlung der genutzten Geräte auf. Selbst wenn die Befragten antworten, wie sie kommunizieren (s. Fragenblock 2), ist noch nicht ersichtlich, wie häufig sie digitale Medien bspw. für eine Beschaffung von Informationen verwenden. Es wird bei dieser Frage lediglich davon ausgegangen, dass infolge entsprechender digitaler Datengewinnungen im Rahmen der Bauausführung hauptsächlich mobile Endgeräte Einsatz finden. Weitere Nutzungsmöglichkeiten, wie z. B. BIM-Modelle, wurden nicht berücksichtigt, da diese bereits im zweiten Block zur Informatisierung abgefragt wurden. Die vier Antwortmöglichkeiten in Frage 7 orientieren sich an der *ZUMA-Antwortskala* des *International Social Survey Programs* (ISSP) (vgl. Prüfer et al. 2003, S. 38).

Fragenblock 4: Prognose (Frage 8)

Im Rahmen der Online-Umfrage stellt insbesondere Frage 8 eine wichtige Grundlage für einen qualitativen Ausblick dar. Mithilfe der gewonnenen Erkenntnisse zur zukünftigen Nutzung digitaler Arbeitsmittel sollen Aussagen – v. a. der kleinen und mittelständischen Bauunternehmen – ein adäquates und realitätsnahes Bild über potenzielle Anschaffungen technologischer Neuentwicklungen ermöglichen. Die angegebenen Zeitspannen der Antwortoptionen beinhalten drei Bereiche: *kurzfristig* (1 bis 2 Jahre), *mittelfristig* (2 bis 5 Jahre) und *langfristig* (5 Jahre oder später). Bei Frage 8 handelt es sich – wie bei Frage 7 zuvor auch – nicht um eine Faktfrage. Die aufeinander bezogenen Antwortmöglichkeiten stellen hier die in Abschnitt 5.1 thematisierten Skalen bereit. Mithilfe der gewonnenen Erkenntnisse aus Frage 8 können mögliche anstehende Phänomene besser eingeschätzt werden.

Um den Befragten die Möglichkeit zu geben, sich generell zum Fragebogen zu äußern, wurde nach den eigentlichen Fragen ein zusätzliches Feld für individuelle Anmerkungen bereitgestellt (vgl. Porst 2014, S. 161).

Anschreiben, Layout und Anonymität der Online-Umfrage

Damit so viele Bauunternehmen wie möglich an der Online-Umfrage teilnehmen, wurde dem Anschreiben besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Abweichend von den Empfehlungen, dass Einstiegsfragen eines Fragebogens das Interesse der Befragten wecken (vgl. Porst 2014, S. 143), wurde eine entsprechende Berücksichtigung – im Hinblick auf eine gewünschte kurze Erhebung – allerdings nicht in der Umfrage selbst, sondern bereits im Anschreiben der E-Mail vorgenommen. Jedoch entfielen allgemeine vorgelagerte Hinweise zum Ausfüllen des Fragebogens im Anschreiben, da die Bearbeitung des Online-Fragebogens selbsterklärend ist und die Einlese- und Bearbeitungszeit der Teilnehmenden durch entsprechende Maßnahmen nur unnötig verlängert werden würde.

Um die Bauunternehmen nun dazu zu bewegen überhaupt an der Umfrage teilzunehmen, wurde der Inhalt des Anschreibens auf mögliche Belange von Bauunternehmen hin ausgerichtet – auch um direkte Verweigerungen zu minimieren (vgl. ebd, S. 142).¹⁴ So sind anregende Aspekte eingeflossen, die nicht nur themenbezogen auf die eigentliche Umfrage abzielen, sondern die ebenfalls eine Teilnahme aus Sicht der Unternehmen begünstigen sollen, bspw. indem Kosten-Nutzen-Abwägungen der Befragten sich positiv auf eine Teilnahme auswirken (vgl. Atteslander 2010, S. 158; Kirchhoff et al. 2010, S. 23; Sonntag et al. 2012, S. 83; Porst 2014, S. 141-S. 143). Durch ein seriöses Auftreten, ein informatives sowie motivierendes Anschreiben wurde ebenfalls versucht Anreize für die Befragten zu schaffen (vgl. Atteslander 2010, S. 158; Kirchhoff et al. 2010, S. 23; Wagner & Hering 2014, S. 663). Neben der Angabe der Dauer zum Ausfüllen des Fragebogens (vgl. Petersen 2014, S. 284; Porst 2014, S. 191), wurde eine Danksagung für die Teilnahme an der Erhebung bereits im Anschreiben berücksichtigt (vgl. Porst 2014, S. 161). Für den Fall, dass von Seiten der Teilnehmenden eventuelle Rückfragen entstehen, wurden ebenfalls Name und Anschrift des Ansprechpartners im Anschreiben vorgesehen (vgl. Atteslander 2010, S. 158; Kirchhoff et al. 2010, S. 23; Porst 2014, S. 37). Ein weiterer und überaus wichtiger Aspekt ist die Berücksichtigung der Anonymität bzw. des Datenschutzes der Teilnehmenden (vgl. Atteslander 2010, S. 158; Kirchhoff et al. 2010, S. 23). Durch einen zusätzlichen Text wurde den Befragten bereits im Anschreiben versichert, dass alle gemachten Angaben vertrauenswürdig und ohne direkten nachvollziehbaren Bezug zu den Unternehmen berücksichtigt wurden. Vor Beginn der Umfrage ist dann ein erweiterter Hinweis hinsichtlich des Datenschutzes im Programm LimeSurvey eingebaut worden:

„Selbstverständlich reichen wir Ihre Daten nicht weiter und gehen damit vertraulich um. Dies bedeutet, dass die Daten an der Technischen Universität Hamburg verbleiben. Ergebnisse können zwar in anonymisierter Form im Rahmen wissenschaftlicher Publikationen veröffentlicht werden, Rückschlüsse auf einzelne Unternehmen oder Personen sind jedoch zu keiner Zeit möglich.“¹⁵

¹⁴Das Anschreiben kann dem Anhang entnommen werden.

¹⁵Bei dem verwendeten Text handelt es sich um einen angepassten Standard-Passus des *Zentrums für Lehre und Lernen (ZLL)*, der im Rahmen des Forschungsvorhabens lediglich leicht verändert wurde.

5.3 Pretest-Analyse und Beschreibung der durchgeführten Umfrage

Die Durchführung eines Pretests steht im Einklang mit dem *Verhaltenskodex für Europäische Statistiken* (vgl. Blanke et al. 2008, S. 642). Es handelt sich um eine unabdingbare Voraussetzung zur Vorbereitung einer Hauptbefragung, bei der unter realistischen Bedingungen eine Testerhebung stattfindet (vgl. Lamnek 2010, S. 677; Porst 2014, S. 190; Reinecke 2014, S. 615). Die aus einer solchen Probemessung optimierten Erhebungsunterlagen sollen letztendlich nicht nur „das Ausfüllen erleichtern und gleichzeitig die Datenqualität [...] erhöhen“ (Blanke et al. 2008, S. 641), sondern auch dafür sorgen, dass die Standardisierung einer Umfrage nicht gefährdet wird (vgl. Weichbold 2014, S. 299). Mithilfe von Pretests können neben der Reihenfolge von Fragen sämtliche Frageformulierungen auf ihre Stimmigkeit, Adäquanz und Verständlichkeit überprüft und verbessert werden (vgl. Kirchhoff et al. 2010, S. 23; Lamnek 2010, S. 667; Porst 2014, S. 116 und S. 118; Weichbold 2014, S. 300).

Erstellung des Pretests für die Online-Umfrage

Noch vor dem eigentlichen Pretest wurden drei Wissenschaftlerinnen und ein Wissenschaftler gebeten den konstruierten Fragebogenentwurf – der sich in dieser Phase noch in einem frühen Stadium befand – zu analysieren (vgl. Porst 2014, S. 205). Neben einer Forscherin der *Technischen Universität Hamburg (TUHH)* wurden ein Berufswissenschaftler und eine Berufswissenschaftlerin der *Universität Hamburg (UHH)* nach ihrer Einschätzung gefragt. Im Rahmen der Erstellung der Online-Umfrage mit dem Programm *LimeSurvey* ist darüber hinaus eine Wissenschaftlerin des *Zentrums für Lehre und Lernen (ZLL)*, das an der TUHH angegliedert ist, zu Rate gezogen worden. Durch die jeweiligen Korrespondenzen im Vorfeld der praxisnahen Prüfung entwickelte sich der Fragebogen stetig weiter, bis er auf Grundlage der recherchierten Fachliteratur und der wissenschaftlichen Analysen getestet werden konnte.

Um die Selbstverständlichkeit der Online-Umfrage vor der eigentlichen Durchführung weiter zu hinterfragen und zu verbessern (vgl. Petersen 2014, S. 116), wurden anschließend an die erste Phase zwei Experten aus der Baupraxis herangezogen.¹⁶ Auch wenn es per se „fast keine Regeln über die Auswahl und Anzahl der Testpersonen“ (Porst 2014, S. 202) gibt, ist es dennoch überaus wichtig, dass eine Stichprobe aus der Grundgesamtheit stammt, die auch dem Befragungsmodus der Haupterhebung entspricht, und dass die Testpersonen, die herangezogen wurden, die Teilnehmerinnen und Teilnehmer der Hauptbefragung widerspiegeln (vgl. Porst 2014, S. 202; Reinecke 2014, S. 615; Weichbold 2014, S. 302). Die beiden Experten wurden nach Fertigstellung des ersten endgültigen Entwurfs gebeten, an der Online-Erhebung teilzunehmen.

¹⁶Eine Liste mit den Positionen der Gesprächspartnerinnen und Gesprächspartner ist im Anhang zu finden.

Bei einem Experten handelt es sich um einen BIM-Manager, der seit einigen Jahren in einem großen deutschen Bauunternehmen in dieser Position tätig ist. Seine Expertise wurde v. a. zur Prüfung der in den Antwortmöglichkeiten aufgeführten neuen und innovativen Arbeitsmittel relevant. Der zweite Experte ist seit mehreren Jahren als Polier im Massivbau bei einem mittelgroßen Hamburger Bauunternehmen beschäftigt. Die Einbindung eines Facharbeiters aus dem Bereich der Bauausführung war insbesondere aufgrund der Nachvollziehbarkeit der Erhebung von Bedeutung. Beide Probanden wurden gebeten, in erster Linie zu beurteilen, ob die erstellte Umfrage verständlich ist bzw. ob es irgendwelche Probleme beim Beantworten der Fragen gegeben hat (vgl. Porst 2014, S. 191 und S. 205).

Ergebnisse der Pretests

Beide Pretests fanden in der 39. Kalenderwoche 2019 statt. Neben der Aussage des BIM-Managers, dass alles soweit verständlich und logisch ist, wurden von insgesamt fünf seiner Anmerkungen vier Anpassung innerhalb des Fragebogens vorgenommen.¹⁷ So war bei den Fragen 4 und 5 – die im Rahmen der Erhebung auf die Informatisierungs- und Kommunikationsvorgänge abzielten – jeweils ein Antwortmöglichkeit mit *Cloud-Lösungen* aufgeführt. Bei diesem wurde vorgeschlagen, dass praxisbezogene Beispiele – wie sie auch bei anderen Antwortmöglichkeiten vorzufinden waren – ebenfalls sinnvoll erscheinen. So wurden zusätzlich zu dem Begriff *Cloud-Lösungen* in Klammern reelle Beispiele genannt: *Dropbox*, *Google Drive* und *WeTransfer*. Darüber hinaus ist bei den Fragen 4 und 5 eine weitere Option hinzugefügt worden. Die Anmerkung des BIM-Managers zielte hier sinnvollerweise auf eine weitere Antwortmöglichkeit ab. So fehlte in der Auflistung ein Antwortoption für die Übermittlung digitaler Pläne, z. B. in Form von *PDF*-, *DWG*- oder *DXF*-Dateien.

Weiter wurden vom Pretest-Teilnehmer zwei Anmerkungen zur Formulierung der Fragen angeführt. Sowohl bei den Fragen 4 und 5, als auch bei Frage 8, wurden aufgrund der Hinweise des BIM-Managers, persönlichere Fragen erstellt. Vor der Prüfung waren die Fragen noch sehr allgemein und ohne direkte Anrede verfasst. Frage 8 erhielt darüber hinaus ebenfalls einen weiteren Zusatz. Während vor dem Pretest lediglich gefragt wurde „Planen Sie größere Anschaffungen digitaler Arbeitsmittel?“, ist aufgrund der gemachten Anmerkungen der Zusatz „oder Ihre Firma“ eingefügt worden, so dass die Frage nach der Anpassung lautete: „Planen Sie *oder Ihre Firma* größere Anschaffungen digitaler Arbeitsmittel?“. Von Seiten des Poliers gab es keine direkten Verbesserungsvorschläge. Die von ihm gemachte nachstehende Anmerkung bestätigte jedoch, dass die Online-Umfrage verständlich und nachvollziehbar ist: „Der Aufbau der Umfrage ist selbst erklärend, die genannten Arbeitsmittel kommen so auch zum Einsatz auf den Baustellen, wo ich tätig bin.“

¹⁷Die genauen Aussagen, die im Rahmen des Pretests gemacht wurden, können dem Anhang entnommen werden.

Auswahl der Bauunternehmen für die Online-Umfrage

Bei der Auswahl von Betrieben, die generell für Umfragen herangezogen werden können, sind übergeordnet grundlegende Kriterien zu berücksichtigen (vgl. Becker & Spöttl 2008, S. 103). Neben der bereits in Abschnitt 5.1 angesprochenen Sektorzugehörigkeit, ist es ebenfalls die Größe eines Betriebes – hier in Form von kleinen und mittelständischen Bauunternehmen – und insbesondere das Geschäfts- bzw. Tätigkeitsfeld oder das Aufgabenspektrum, dass für eine Auswahl herangezogen werden sollte (vgl. ebd.). Im vorliegenden Forschungsvorhaben handelt es sich dabei um Bauunternehmen, die v. a. im Massivbau verortet sind. In vielen Fällen gab es durch die Nutzung der Angaben auf den Internetseiten der Handwerkskammern auch die Möglichkeit lokal ansässige Handwerksbetriebe aus dem Bereich des Massiv- bzw. Rohbaus zu finden. Da bei der anschließenden Akquise von Betrieben i. d. R. Abweichungen zur Zugehörigkeit, z. B. bei Gewerke- oder Tätigkeitsüberschneidungen, nicht vollständig zu vermeiden waren, wurden im Rahmen der Recherche entstehende Kompromisse vorerst akzeptiert (vgl. Becker & Spöttl 2008, S. 104). Anpassungen konnten durch die zuvor erläuterte Standardisierung des Fragebogens im Zuge der im folgenden Abschnitt 5.4 vorgenommenen Auswertungen entsprechend trennscharf umgesetzt werden. Über das reine Anschreiben der Bauunternehmen heraus, wurden ebenfalls verschiedene zufällig ausgewählte Handwerksbetriebe per Telefon kontaktiert und gefragt, ob sie an der Umfrage teilnehmen möchten. Bei Zusage bzw. Bereitschaft wurden E-Mails personalisiert an die jeweiligen Gesprächspartnerinnen und Gesprächspartner verschickt. Es ist davon auszugehen, dass im Vergleich zu den E-Mail-Versendungen v. a. die zuvor kontaktierten Betriebe an der Umfrage teilgenommen haben. Da die Umfrage jedoch anonym war, ist eine Auswertung diesbezüglich nicht möglich.

5.4 Auswertung und Interpretation der Online-Umfrage

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Online-Erhebung aufgeführt und in Bezug auf die vorangestellten Thesen interpretierend dargestellt. Die Umfrage wurde am Montag, den 3. August 2020 gestartet und am Mittwoch, den 2. September 2020 beendet. Von insgesamt 299 angeschriebenen Baufirmen haben 36 die Online-Befragung begonnen, 27 Unternehmen haben die Umfrage abgeschlossen. Die Angaben der 27 Teilnehmer/-innen wurden für die nachfolgende Auswertung herangezogen. Es ergibt sich insgesamt eine Rücklaufquote von 9 %. Die Auswertung beinhaltet vordergründig die Darstellung der Ergebnisse durch Kategorisierungen bzw. durch übersichtliche Zusammenfassungen in Form von Diagrammen.¹⁸ Umfangreiche Cluster- oder Korrespondenzanalysen waren aufgrund der direkten bzw. einfachen Zusammenhänge nicht notwendig.¹⁹ Für die Darstellung der Ergebnisse – die nachfolgend in % angegeben sind – wurde das Programm *Excel* genutzt.²⁰ Alle grundlegenden Daten, die im Rahmen der Befragungen erfasst wurden, aber hier nicht aufgeführt sind, können dem Anhang entnommen werden.

Um darzustellen, wer an der Online-Umfrage teilgenommen hat, werden zuerst die gemachten Angaben zu den Fragen 1 bis 3 erläutert. Danach sind die Ergebnisse aus den Fragen 4 bis 8 dargestellt. Mit den Daten zu den Informatisierungsprozessen während der Bauausführung werden beginnend die ersten thesenbezogenen Erkenntnisse erörtert (Frage 4). Anknüpfend an die Darstellung der Kommunikationswege auf Baustellen (Frage 5), finden sich weitere Ergebnisse zu aktuell verwendeten digitalen Geräten wieder (Frage 6). Fortführend ist aufgezeigt, wie häufig Applikationen bzw. andere Möglichkeiten von Smartphones im Baustellenbetrieb genutzt werden (Frage 7), bevor am Ende potenzielle zukünftige Anschaffungen erörternd dargestellt sind (Frage 8). Abschließend werden drei Anmerkungen interpretiert, die am Ende der Umfrage von den Teilnehmer/-innen vorgenommen wurden (Frage 9).

Verortung der Tätigkeitsfelder der Bauunternehmen

Von den insgesamt 27 Bauunternehmen, die an der Umfrage teilgenommen haben, können 9 Baufirmen dem Bereich des Rohbaus, 7 dem Bereich des Ausbaus und 5 dem Bereich der Renovierung bzw. Sanierung zugeordnet werden. Darüber hinaus haben 6 der Betriebe unter dem Punkt *Sonstiges* angegeben, dass sie in weiteren Bereichen tätig sind. Ein Unternehmen hat diesbezüglich mitgeteilt, dass sie in allen drei vorgegebenen Bereichen arbeiten, so dass aufgrund der Erstnennung des Rohbaus eine Verteilung auf diese Kategorien vorgenommen werden konnte. Bei den weiteren Angaben handelte es sich um Maurerarbeiten, Natursteinarbeiten, Trockenbauarbeiten, Stuckateurarbeiten und

¹⁸Für die generelle Auswertung von Umfragen sei an dieser Stelle auf Atteslander (2010, S. 291-320), Kirchhoff et al. (2010, S. 46-69) oder Handl & Kuhlenkasper (2018, S. 5) verwiesen.

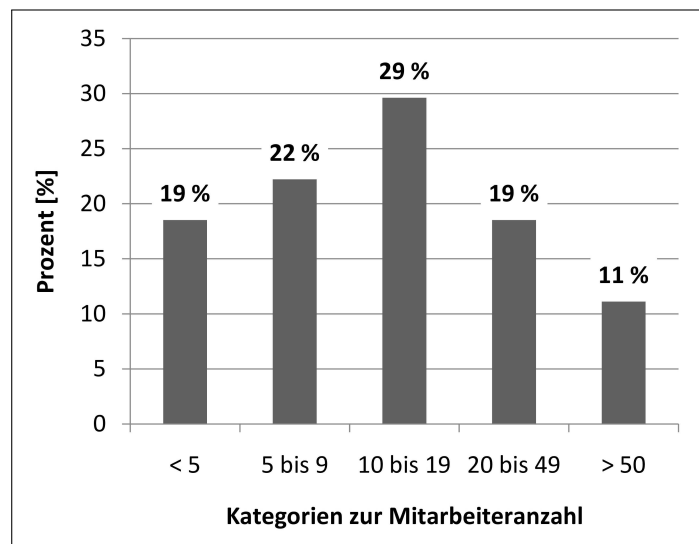
¹⁹Vorgehensweisen zu Cluster- oder Korrespondenzanalysen können bspw. Kirchhoff et al. (2010, S. 71-107) entnommen werden.

²⁰Das für die Online-Umfrage verwendete Programm *LimeSurvey* bietet nur grundlegende Auswertungsmöglichkeiten an, so dass die im vorliegenden Abschnitt aufgeführten Erkenntnisse mit dem Tabellenkalkulationsprogramm *Excel* erstellt wurden.

das Ausführen von Kernbohrungen. Insgesamt ergeben sich folgende Prozentangaben: 33 % für den *Rohbau*, 26 % für den *Ausbau*, 19 % für *Renovierungs-* bzw. *Sanierungsarbeiten* und 22 % für *Sonstiges*. Da aufgrund der gleichmäßigen Verteilung und der damit fehlenden Gewichtung eines der aufgeführten Bereiche keine sinnvollen kategorialen Erkenntnisse festgehalten werden können, wird im Folgenden keine Unterteilung nach Tätigkeitsbereichen vorgenommen. Die hier aufgeführten Angaben sind daher als rein informativ anzusehen.

Übersicht über die Anzahl der Beschäftigten auf Baustellen

Bei der Beantwortung der zweiten Frage haben die Unternehmen angegeben, wie viele Personen auf der Baustelle tätig sind. Von den insgesamt 27 Betrieben gab es lediglich 3 Baufirmen, die über 50 Personen in der Bauausführung beschäftigen (s. Abb. 5.3).



Diese machen im Rahmen der Umfrage einen Anteil von 11 % aus. Die größte Beteiligung mit 8 Antworten stellen die Betriebe dar, die zwischen 10 und 19 Beschäftigte vor Ort haben. Es handelt sich dabei um fast ein Drittel der beteiligten Unternehmen (29 %). Der Anteil der Baufirmen, die weniger als 5 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter auf Baustellen haben, kann mit 19 % verbucht werden (5 Antworten). Den gleichen Prozentsatz weisen die Unternehmen auf, die Mitarbeiterzahlen zwischen 20 und 49 Personen haben. Etwas

Abb. 5.3: Übersicht über die Anzahl der Beschäftigten auf Baustellen (alle Unternehmen, n = 27)

höher liegen die Werte der Betriebe mit 5 bis 9 Beschäftigten (22 %). Für die nachfolgenden Darstellungen werden alle Baufirmen für die Auswertung herangezogen. Sobald eine Unterscheidung vorgenommen wurde, z. B. bei der Verwendung digitaler Arbeits- und Hilfsmittel auf Baustellen, hat eine Kategorisierung nach Unternehmensgröße kontextbezogen stattgefunden.

Positionen der Teilnehmerinnen und Teilnehmer in den Bauunternehmen

Auch wenn – wie später noch gezeigt wird – die Nutzung mobiler Endgeräte bzw. das Abrufen von E-Mails auf Baustellen bereits vielfach genutzt wird, kann bei der Interpretation der Zuordnung der Teilnehmerinnen und Teilnehmer vorab festgehalten werden, dass die Mehrheit der Personen, die die Fragen beantwortet haben, aus eher stationären Arbeitsbereichen stammt. So können insgesamt 15 Personen dem Feld der Geschäftsführung zugeordnet werden (55 %), während am zweithäufigsten Teilnehmer/-innen aus Bereichen der Verwaltung mit 11 Antworten bzw. 41 % zu verzeichnen sind. Dass v. a. die Kategorien der Geschäftsführung bzw. der Verwaltung hervorstechen, ist aufgrund der Möglichkeiten zur Beantwortung der Fragen nicht verwunderlich. Beide Bereiche können einen Großteil ihrer Aufgaben in Büros – meistens mit einem direkten Zugang zu E-Mails – erledigen. Die Umfrage konnte daher unmittelbar beantwortet werden. Lediglich eine Person hat angekreuzt, dass sie in der Facharbeit tätig ist. Darüber hinaus hat niemand angegeben, dass Personen aus dem Bereich der Planung kommen. Auch dies ist nachvollziehbar, da v. a. kleinere Bauunternehmen an der Umfrage teilgenommen haben, die entsprechende Bereiche nicht aufweisen.

Informatisierungsvorgänge auf Baustellen

In Abb. 5.4 ist dargestellt, wie auf die Frage „Wie werden bauwerksrelevante Informationen an die Baustelle vermittelt“ geantwortet wurde. Es ist zu erkennen, dass die meisten Angaben über Telefonate bzw. digitale Dokumente (z. B. PDF-Dateien) auf die Baustelle gelangen. Beide Kategorien weisen Werte von 70 % auf.

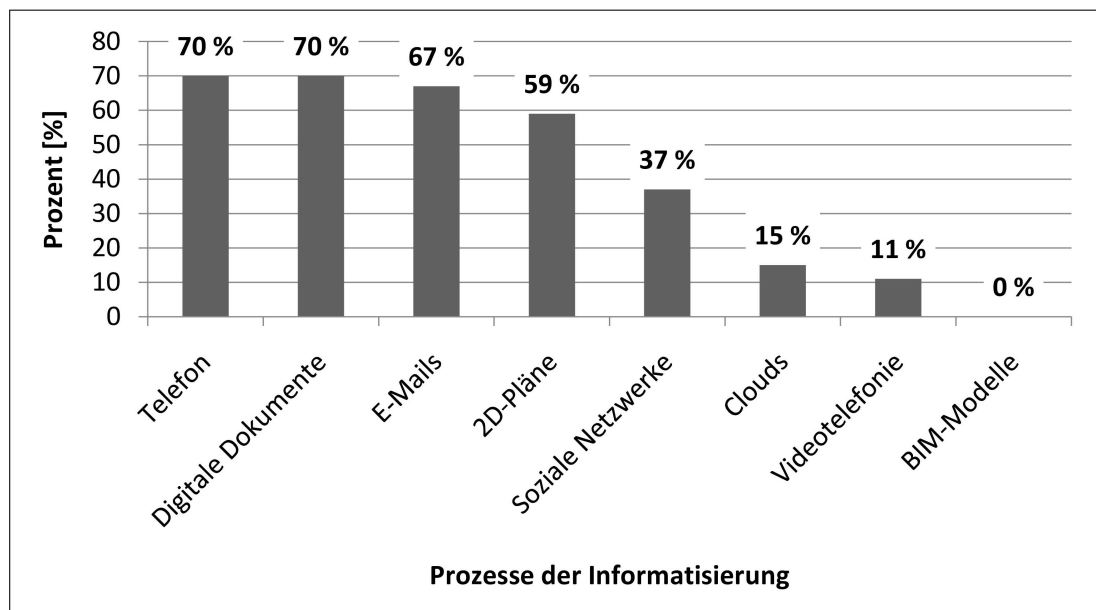


Abb. 5.4: Informatisierungsprozesse auf Baustellen (alle Unternehmen, n = 27)

Notwendige Informationen werden i. d. R. als Anhang von E-Mails versendet. Möglich sind darüber hinaus aber ebenfalls Datenaustausch-Szenarien, die mithilfe von sozialen Netzwerken, z. B. über Dienste wie WhatsApp, stattfinden (37 %). Auch das bereits zuvor angesprochene Cloud Computing bietet entsprechende Potenziale. Von den 27 befragten Unternehmen nutzen bspw. bereits 15 % diese Informatisierungsmöglichkeiten. Dass per se viele Prozesse über einen Austausch per E-Mail-Verkehr stattfinden (67 %), ist nicht weiter verwunderlich, weil durch die zuvor angesprochenen mobilen Endgeräte notwendige Ausführungsunterlagen auch auf Baustellen unmittelbar abgerufen werden können. Handelt es sich jedoch nicht um digitale Informationen oder Dokumente, so finden bei vielen Bauunternehmen Übermittlungen von Ausführungsunterlagen über zweidimensionale Zeichnungen statt (59 %). Weniger häufig werden Prozesse der Videotelefonie genutzt (11 %). BIM-Modelle sind bisher noch in keinem der befragten Unternehmen im Einsatz.²¹

Kommunikationsvorgänge auf Baustellen

Abb. 5.5 kann anknüpfend an die Erkenntnisse zu Datenaustausch-Szenarien entnommen werden, dass viele Interaktionen durch E-Mail-Verkehr (100 %), über Telefonate (96 %) oder mithilfe von digitalen Dokumenten (78 %) stattfinden. Es wird sofort ersichtlich,

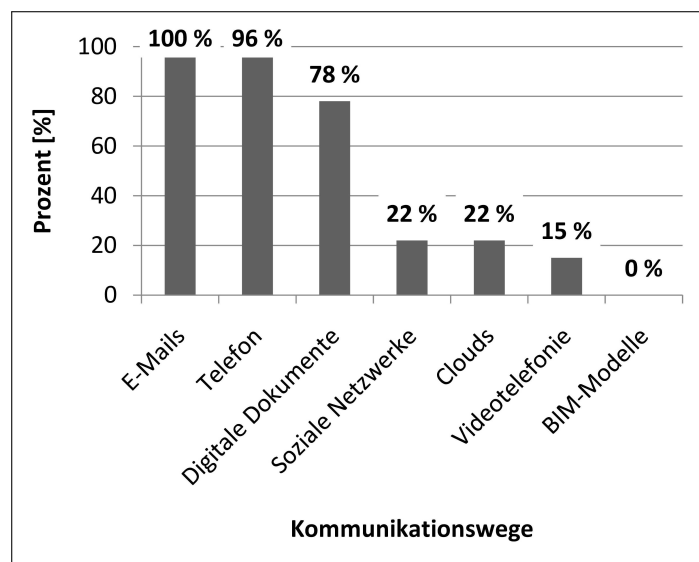


Abb. 5.5: Kommunikationsprozesse während der Bauausführung (alle Unternehmen, n = 27)

dass die ersten drei Säulen – im Vergleich zu den weiteren Kommunikationsarten – den größten Anteil ausmachen. Alle 27 befragten Bauunternehmen gaben an, dass sie über E-Mails kommunizieren. Auch die Interaktionen über Telefone stellen mit 96 % ebenfalls einen hohen Wert dar. Mehr als zwei Drittel der Baufirmen nutzt darüber hinaus digitale Dokumente, die heutzutage als Grundlage für die Errichtung von Gebäuden für fast jedes Bauvorhaben notwendig und daher als Kommunikationsmittel unerlässlich sind. Weniger häufig kommen allerdings soziale Netzwerke, Cloud-Lösungen oder Konferenzen

²¹Eine Unterteilung der gewonnenen Erkenntnisse zu den in Abb. 5.4 dargestellten Informationsweitergaben nach Betriebsgrößen wurde nicht vorgenommen, da sich kein aussagekräftiges Bild eingestellt hat. Im Zuge der Auswertung wurde jedoch eine Kategorisierung vorgenommen. Im Anhang befindet sich das zugehörige Säulendiagramm.

per Video zum Einsatz (s. Abb. 5.5). Wie bereits bei den Angaben zur Informatisierung wird ebenfalls nicht über BIM-Modelle kommuniziert, was z. B. mithilfe des *BIM Collaboration Formats (BCF)* möglich wäre. Es sei an dieser Stelle zudem angemerkt, dass die persönliche Kommunikation vor Ort nicht berücksichtigt wurde, da ohne diese Form der Interaktion die Prozesse auf Baustellen – bei denen es sich stets um Team- bzw. Gruppenarbeiten handelt – per se nicht durchgeführt werden könnten.

Verwendung digitaler Arbeits- und Hilfsmittel

Bei der Auswertung zur Frage „Welche Geräte und Technologien verwenden Sie im Baustellenbetrieb“ fällt auf, dass die in Abschnitt 2.4.1 behandelten Smartphones den größten Anteil an digitalen Arbeitsmitteln auf Baustellen ausmachen (s. Abb. 5.6). Unabhängig von der Nutzungshäufigkeit – die nachfolgend noch analysiert wird – ist deutlich zu erkennen, dass fast alle Bauunternehmen Smartphones im Baustellenbetrieb verwenden (96 %). Tablets hingegen – die auch zu den mobilen Endgeräten zählen – sind mit 48 % nur halb so oft im Einsatz. Dies betrifft auch die Nutzung von Computern und Laptops.

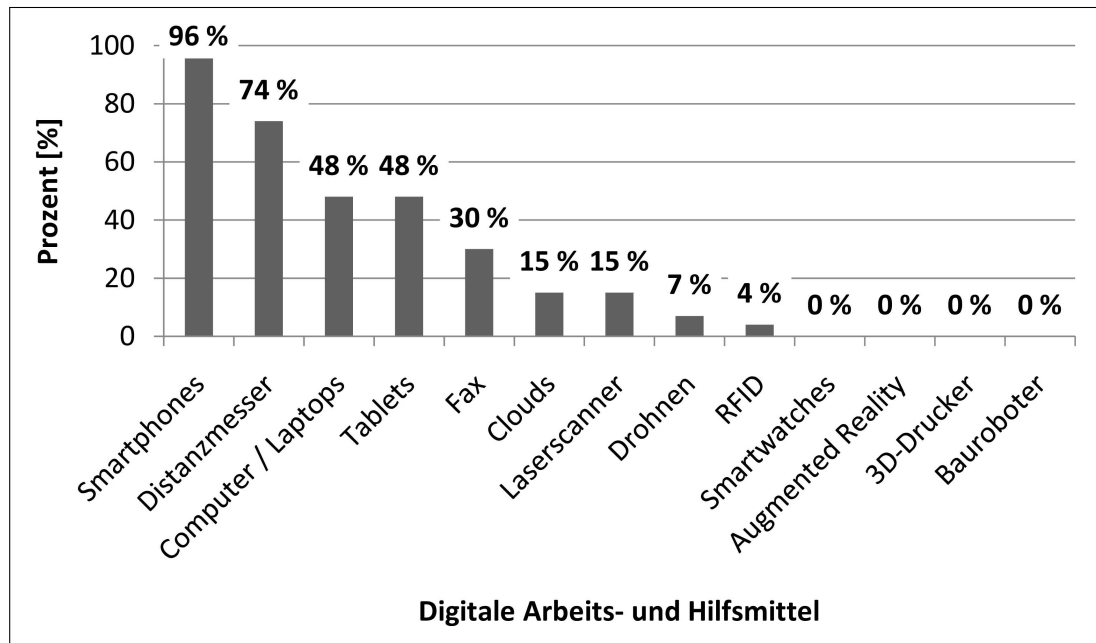


Abb. 5.6: Verwendung digitaler Arbeits- und Hilfsmittel (alle Unternehmen, n = 27)

Eine deutlich größere Verwendung finden hingegen Laserdistanzmesser (Distos), die bei ca. zwei Drittel der befragten Unternehmen im Baustellenbetrieb genutzt werden. Interessant ist die Angabe, dass stellenweise auch noch Faxgeräte im Baustellenbetrieb eingesetzt werden (30 %), obwohl – wie bereits zuvor erwähnt – auch Möglichkeiten per E-Mail herangezogen werden können. Wie bei den Erkenntnissen zu den Prozessen

der Informatisierung bzw. der Kommunikation ersichtlich wurde, kann auch hier festgehalten werden, dass einige Bauunternehmen bereits Cloud-Lösungen nutzen (15 %). Ebenfalls 15 % weisen Laserscanner auf, die, wie bereits in Abschnitt 2.4.3 erläutert, recht einfach zu handhaben und stellenweise auch schon recht erschwinglich sind, so dass die gewonnen Erkenntnisse ein zu erwartendes bzw. nachvollziehbares Abbild der Prozesse auf Baustellen darstellen. Die Angabe, dass bereits Drohnen auf Baustellen eingesetzt werden hat wiederum mit entsprechenden Bestands- bzw. Laseraufnahmen zu tun, die nicht nur vom Boden, sondern auch aus der Luft vorgenommen werden können. In der Online-Umfrage haben zwei Bauunternehmen angegeben, dass sie entsprechende Fluggeräte verwenden. Es handelt sich einmal um einen Betrieb mit mehr als 50 Mitarbeiter/-innen und einmal um einen Betrieb mit 10 bis 19 Mitarbeiter/-innen. Die RFID-Technik wird bisher nur von einem Unternehmen eingesetzt. Dass auf Baustellen noch keine AR-Anwendungen, kein 3D-Druck und auch keine Bauroboter eingesetzt werden, ist in Anlehnung an die aufgestellte These, dass digitale Arbeits- und Hilfsmittel noch nicht weit verbreitet sind, zu erwarten gewesen. Hier sei jedoch angemerkt, dass es v. a. die Augmented Reality sowie der Einsatz von Robotern ist, die für Baustellenarbeitsprozesse immer relevanter werden. Im Hinblick auf die zukünftig weiter zunehmenden Mensch-Maschine-Interaktionen im soziotechnischen System Baustelle sind diese Punkte demnach besonders zu berücksichtigen.

Nutzungshäufigkeit mobiler Endgeräte auf Baustellen

Die Auswertung der Frage „Wie häufig nutzen Sie Apps bzw. Funktionen Ihres Smartphones oder Tablets für baustellenbezogene Tätigkeiten“ ist in Abb. 5.7 dargestellt. Es ist klar zu erkennen, dass entsprechende mobile Endgeräte bereits häufig zum Einsatz

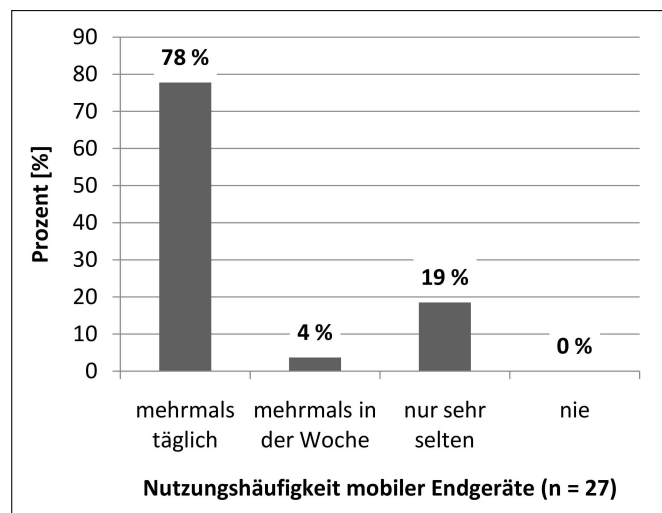


Abb. 5.7: Nutzungshäufigkeit mobiler Endgeräte auf Baustellen (alle Unternehmen, n = 27)

kommen. So nutzen 78 % der befragten Unternehmen mehrmals täglich entsprechende, mit den digitalen Medien verbundenen Möglichkeiten. 21 der 27 Bau-firmen gehen somit bereits die Informations- und Kommunikationswege, die sich auch in den zuvor dargestellten Erkenntnissen zur Informatisierung bzw. zu den damit einhergehenden vielfältigen Interaktionen widerspiegeln. Bei der Angabe von insgesamt 5 Unternehmen, die entsprechende Dienste von Smartphones und Tablets nur sehr selten nutzen, handelt es sich jeweils um Bau-firmen mit 5 bis 9 Mitarbeiter/-innen. Angemerkt sei an dieser

Stelle noch, dass eine weitere Unterscheidung der Nutzungshäufigkeit nach Unternehmensgrößen im Rahmen der Auswertung nicht sinnvoll ist, da sich kein klares interpretierbares Bild einstellt.

Zukünftige Anschaffungen digitaler Arbeits- und Hilfsmittel in Bauunternehmen

Um einschätzen zu können, ob sich Bauunternehmen in Zukunft digitale Geräte und Medien zulegen, wurden in Frage 8 der Online-Umfrage vier Vorgaben gemacht, in denen sich die befragten Betriebe verorten konnten.²²

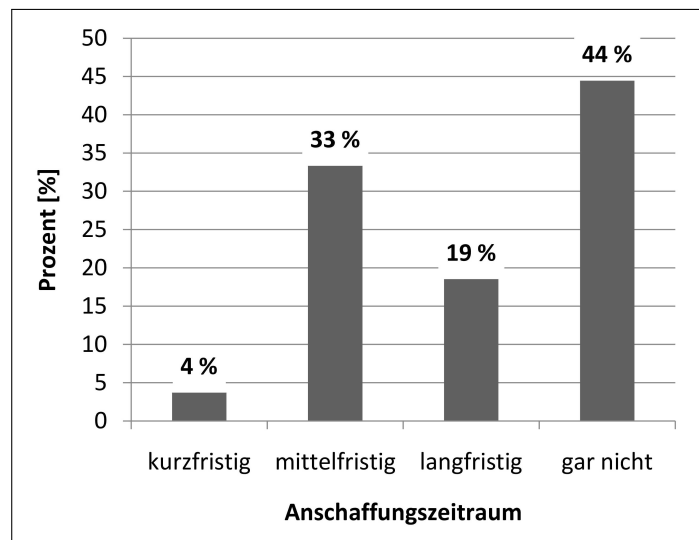


Abb. 5.8: Mögliche Anschaffungen digitaler Arbeits- und Hilfsmittel (alle Unternehmen, n = 27)

Auch wenn Abb. 5.8 kein eindeutiges Bild liefert, ist zu erkennen, dass bisher nur ein geringer Teil der befragten Bauunternehmen geplant hat, sich digitale Arbeits- und Hilfsmittel anzuschaffen. In einem kurzfristigen Zeitraum von ca. ein bis zwei Jahren hat lediglich eine Baufirma angegeben, dass sie sich diesbezüglich über entsprechende Maßnahmen Gedanken macht (4 %). Das Unternehmen hat 10 bis 19 Mitarbeiter/-innen, die auf der Baustelle tätig sind. Weiter sind es 9 Betriebe, die sich eher mittelfristig, also zwischen zwei bis fünf Jahren,

ggf. mit digitalen Werkzeugen und Geräten ausstatten werden (33 %). Über langfristig angedachte Anschaffungen im Zeitraum von fünf Jahren oder später haben insgesamt 5 der Bauunternehmen angegeben, dass sie möglicherweise neue Investitionen tätigen. Den größten Anteil machen jedoch die Betriebe aus, die gar nicht geplant haben, sich digitale Arbeits- und Hilfsmittel anzuschaffen. Insgesamt handelt es sich fast um die Hälfte der befragten Unternehmen (44 %). Ein Grund, warum dieses Phänomen bei mehreren Baufirmen auftritt, wird nachfolgend anhand einer Aussage, die im Rahmen der Online-Umfrage getätigt wurde, beispielhaft dargelegt. An dieser Stelle sei zudem darauf hingewiesen, dass eine Unterteilung nach Unternehmensgrößen kein klares Bild über mögliche Anschaffungen liefert und daher an dieser Stelle nicht vorgenommen wurde.

²²Hier sei noch einmal erwähnt, dass die vorherigen Frage bereits kognitive Anker bereitgestellt haben. Durch das Aufzählen potenzieller digitaler Arbeits- und Hilfsmittel in den Fragen 4 bis 6, konnten die Teilnehmer/-innen bereits auf mögliche Anschaffungen gedanklich zurückgreifen.

Übergeordnete Interpretation der Ergebnisse zur Online-Umfrage

Mit Bezug zu den in Abschnitt 5.2 aufgestellten Thesen für die Online-Umfrage wird nachfolgend aufgeführt, wie die im Rahmen der Erhebung gemachten Angaben bewertet werden können. Über die praktische Bedeutsamkeit der ermittelten Daten hinaus, wird am Ende des vorliegenden Abschnitts zudem auf die Kernthese 1 (*Die Nutzung digitaler Arbeitsmittel auf Baustellen befindet sich aktuell noch im Anfangsstadium.*) und die Kernthese 4 (*Die Einbindung digitaler Arbeitsmittel auf Baustellen findet eher langsam statt.*) zurückgegriffen, um mithilfe der gewonnenen Erkenntnisse aus der Online-Umfrage Bezug zu den übergeordneten Aspekten des Forschungsvorhabens herzustellen. Zuvor werden jedoch Aussagen aufgegriffen, die am Ende der Online-Umfrage von drei Teilnehmer/-innen ergänzend vorgenommen wurden.

Ein Bauunternehmen, das zwischen 5 und 9 Fachkräfte auf Baustellen beschäftigt, hat geschrieben, dass ein „Handwerkerprogramm“ in Planung ist. Bei dieser Aussage ist davon auszugehen, dass es sich aller Voraussicht nach um eine Software-Applikation für mobile Endgeräte handelt, die bspw. den Baustellenbetrieb besser organisiert bzw. projektspezifische Vorkommnisse festhält oder Einträge von Arbeitsstunden ermöglicht. Da bereits viele entsprechende Applikationen existieren, ist es durchaus wahrscheinlich, dass sich das Unternehmen ein solches Programm zulegen möchte. Auch wenn beim Einsatz solcher Software in den meisten Fällen noch keine direkte Verknüpfung zu zentralen BIM-Modellen besteht, stellt sich der Einsatz entsprechender Applikationen – wie bereits in Abschnitt 3.1.2 dargestellt – auch für kleinere Betriebe als überaus sinnvoll dar.

Weiter hat ein Unternehmen am Ende der Online-Umfrage geschrieben: „Wir sind ein kleines Baugeschäft, das hauptsächlich für private Haushalte Arbeiten ausführt. Für uns ist es nicht notwendig aufwendige digitale Medien zu verwenden. Hier ist es wichtig persönlich vor Ort die Arbeiten zu besprechen.“ Da das Unternehmen, das diese Aussage getätigt hat, weniger als 5 Mitarbeiter/-innen auf Baustellen beschäftigt, ist eine entsprechende Aussage nicht verwunderlich. Viele Aufträge werden vermutlich auf Basis von Bekanntschaften oder Weiterempfehlungen ausgeführt. Interessant ist v. a. die Aussage, dass ein Aufwand mit der Einbindung digitaler Arbeits- und Hilfsmittel verbunden wird.

Bei einem Bauunternehmen mit 10 bis 19 Mitarbeiter/-innen wurde weiterhin eine Anmerkung mit Bezug zu möglichen Lösungsansätzen vorgenommen:

„Die Verwendung moderner Software (Projektmanagement) ist oftmals vom Kenntnisstand der involvierten Mitarbeiter abhängig. Um eine optimale und sinnvolle Digitalisierung im Unternehmen umzusetzen erfordert eine, für uns als Laien auf diesem Gebiet, nachvollziehbare Erläuterung zur passgenauen Anschaffung. Eine entsprechende Schulung der Mitarbeiter ist dann eine Konsequenz, die wir als Unternehmen gern mittragen. Was wir genau benötigen und welche Bausteine wirklich notwendig werden, ist im Moment für uns nicht einzuschätzen.“

Bei der hier aufgeführten Aussage ist hervorzuheben, dass die Nichteinschätzung zu möglichen Änderungen infolge Digitalisierung ein Problem darstellt. Es ist davon auszugehen, dass dieses Phänomen vermutlich unternehmensübergreifend auftritt – v. a. dann, wenn es sich um sehr kleine Betriebe handelt. Die ebenfalls angesprochene „passgenaue Anschaffung“ bestätigt darüber hinaus, dass Betriebe stellenweise nicht wissen, welche Technologien zukünftig für sie relevant werden. In Anlehnung an die Erkenntnisse aus Abschnitt 3.3 sei an dieser Stelle noch einmal erwähnt, dass es für die zweite Allokationsstufe insbesondere die Augmented Reality und diverse Bauroboter sind, die für Baustellenarbeitsprozesse zunehmend an Bedeutung gewinnen werden. Eine passgenaue Anschaffung kann jedoch zu keinen Zeitpunkt exakt vorgegeben werden, was v. a. durch die bereits zuvor aufgeführten verschiedenen nicht routinemäßigen Aufgaben bzw. durch die Erstellung von Unikaten ersichtlich wird. Auch die Tatsache, dass es sich im Zuge der Digitalisierung um sehr schnelle Entwicklungen handelt, erschwert die Konstatierung übergeordneter Aspekte. Jedoch können neben der bereits zuvor erwähnten Augmented Reality und der Baurobotik diverse Kernelemente genannt werden, die insbesondere mit der Methode BIM zusammenhängen. Damit einhergehende und potenzielle Ausbildungsinhalte für Baufachkräfte werden in Abschnitt 6.2 aufgegriffen.

Die vier in Abschnitt 5.2 aufgeführten Thesen, die als Grundlage für die Online-Umfrage herangezogen wurden, können v. a. darin bestätigt werden, dass die Digitalisierung bei kleinen und mittelgroßen Bauunternehmen nicht so stark ausgeprägt ist, wie es in vielen Fachmedien bereits dargestellt wird (These 1). Auch die Tatsache, dass die Kommunikation auf Baustellen hauptsächlich über Telefonate, mithilfe von E-Mails oder über Informationen auf zweidimensionalen Papierplänen stattfindet, ist bekräftigt worden (These 2). Aber auch die Thesen 3 und 4 konnten durch die Umfrage untermauert werden. So findet eine Nutzung digitaler und zentraler Gebäudeinformationsmodelle nicht nur teilweise, sondern bei den befragten Unternehmen bisher sogar überhaupt nicht statt (These 3). Ebenfalls konnte bestätigt werden, dass kleine und mittelgroße Bauunternehmen eher langfristig eine Einführung digitaler Baugeräte und Technologien planen (These 4).

Um die Erkenntnisse, die im Rahmen der Online-Umfrage gewonnen wurden, mit den vorangestellten Thesen des Forschungsvorhabens zusammenzubringen, werden zwei relevante Aussagen noch einmal aufgegriffen. Die erste Kernthese aus Abschnitt 1.1 besagt, dass die Nutzung digitaler Arbeitsmittel auf Baustellen sich aktuell noch im Anfangsstadium befindet. Diese Annahme kann im Hinblick auf die Menge an möglichen digitalen Geräten und Werkzeugen bestätigt werden. Jedoch hat die Umfrage auch gezeigt, dass v. a. mobile Endgeräte bereits sehr häufig während der Bauausführung zum Einsatz kommen. Dennoch stellt sich der Digitalisierungsgrad bei kleinen und mittelständischen Bauunternehmen als sehr gering dar. Die vierte These, dass die Einbindung digitaler Arbeitsmittel auf Baustellen eher langsam stattfindet, kann ebenfalls auf Grundlage der Online-Umfrage bekräftigt werden. Auch wenn aufgrund der Stichprobe von 27 Unternehmen das Datenmaterial nicht einfach für weitere Bauunternehmen übernommen bzw. generalisiert werden kann, ist aufgrund der zu Beginn des Forschungsvorhabens auf-

gestellten Kernthese und mithilfe einer auf den Erkenntnissen aufbauenden Annahme davon auszugehen, dass die Ergebnisse der Online-Umfrage einen Großteil der Bauunternehmen in Deutschland betreffen.

6 Diskussion und Fazit

6.1 Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse

Mithilfe einer chronologischen Abfolge anhand der vorangestellten Kapitel wird nachfolgend aufgeführt, welcher übergeordnete wissenschaftliche Mehrwert im Rahmen des Forschungsvorhabens erzielt wurde. Durch eine zusammenfassende Übersicht sind diesbezüglich wesentliche Inhalte der einzelnen Kapitel bzw. Abschnitte rekapitulierend dargestellt. Beginnend mit den expliziten Erkenntnissen zu dem initiierten Phänomen der Methode BIM und den für Baustellenarbeitsprozesse zukünftig relevanten digitalen Arbeits- und Hilfsmitteln werden anschließend die daraus resultierenden Veränderungen aufgeführt. Ergänzend sind daraufhin die wesentlichen Auswirkungen und die zusätzlich im Kern des Forschungsvorhabens angesiedelten Elemente der Informatisierung und Kommunikation zusammengefasst. Daran anschließend finden sich relevante Punkte aus den Erkenntnissen der Online-Umfrage wieder. Anknüpfend an die gebündelte Wiedergabe der wesentlichen Inhalte werden weiterführend – bzw. durch Rückgriff auf die in Abschnitt 1.1 verorteten Kernthesen – markante übergeordnete Aspekte dargestellt. Weiterhin sind in Abschnitt 6.2 wesentliche Erkenntnisse zu Ausbildungsinhalten aufgeführt. Das Forschungsvorhaben schließt mit einem Ausblick, in dem nicht nur weitere wissenschaftlich ausgerichtete Forschungsansätze benannt werden, sondern zusätzlich politische und wirtschaftliche Aspekte thematisiert sind.

Digitale Konzepte und Neuentwicklungen für die Bauausführung (Kapitel 2)

In Kapitel 2 wird nach einer Definition des Begriffs Digitalisierung dargelegt, welche Effekte durch dieses Phänomen in der Bauindustrie zu erwarten sind. Insbesondere die Methode des Building Information Modeling spielt diesbezüglich bei den Abwicklungen zukünftiger Bauprojekte eine zentrale Rolle. In Abschnitt 2.4 werden, angelehnt an die Erkenntnisse zum neuen Vorgehen, explizit sechs übergeordnete Kategorien digitaler Technologien aufgeführt, die zukünftig maßgebend für Baustellenarbeitsprozesse in Frage kommen. Neben bereits auf Baustellen zu findenden mobilen Endgeräten oder auch der bei größeren Bauobjekten stellenweise genutzten RFID-Technologie sind es im Hinblick auf anstehende digitale Arbeitsprozesse im Handwerk insbesondere Augmented Reality-Anwendungen und die Baurobotik, die zunehmend eine immer stärkere Wichtigkeit erlangen werden. Der wissenschaftliche Mehrwert durch die Sektoranalyse in Kapitel 2 liegt klar in der Kategorisierung der sechs aufgeführten technologischen Neuentwicklungen – nicht nur vereinzelt für die weitere Verwendung im Forschungsvorhaben, sondern insbesondere auch für einen generellen Überblick darüber, welche digitalen Geräte in Zukunft für die Bauausführung relevant werden.

Auswirkungen der Digitalisierung auf Baustellenarbeitsprozesse (Kapitel 3)

Wie in Abschnitt 3.1 aufgezeigt, erzeugen die Einflüsse der Digitalisierung auf Baustellentätigkeiten im Wesentlichen Änderungen im Prozessverständnis, in den Informatisierungsprozessen, in der Aneignung neuer Vokabeln, den damit verbundenen Rollenzuweisungen sowie im Hinblick auf zukünftig digital auszuführende Baudokumentationen. In Abschnitt 3.2 wurden neben diesen relevanten Veränderungen zusätzlich die Auswirkungen auf Substituierbarkeiten und Automatisierungswahrscheinlichkeiten von Baufacharbeiterinnen und Baufacharbeitern beleuchtet. Da das Handwerk, anders als in anderen Branchen, den in Abschnitt 3.4 aufgeführten Faktoren unterliegt, handelt es sich bei der Erstellung von Bauwerken vornehmlich um Nicht-Routine-Tasks. Die Kombination dieser Tatsache mit den Implementierungen digitaler Werkzeuge konnte im Hinblick auf den anstehenden soziotechnischen Wandel von Baustellen wieder aufgegriffen und in Abschnitt 3.3.3 antizipierend auf potenzielle Cyberphysische Systeme hin diskutiert werden. Zunehmende Einbindungen von Baurobotern und Maschinen sind dabei nicht nur für große Baukonzerne, sondern auch für kleine und mittelständische Unternehmen relevant, was sich einerseits in den Implementierungen digitaler Arbeits- und Hilfsmittel widerspiegelt, aber auch im Hinblick auf die vielen echtzeitnahen Prozesse als unvermeidlich darstellt. Die wesentlichen Erkenntnisse von Kapitel 3 liegen v. a. in den zuvor genannten Änderungen für zukünftige BIM-Nutzerinnen und BIM-Nutzer, sowie in der Tatsache, dass Mensch-Maschine-Interaktionen auch im Rahmen von Nicht-Routine-Tätigkeiten auf Baustellen zunehmen und darüber hinaus auch immer komplexer werden.

Informatisierungs- und Kommunikationsprozesse auf Baustellen (Kapitel 4)

Durch die Methode BIM wird zukünftig vermehrt in Projektteams auf einer virtuellen Basis – i. d. R. auf Grundlage eines zentralen Bauwerksinformationsmodells – disziplin- und gewerkeübergreifend zusammengearbeitet. Um die daraus entstehenden Anforderungen auch auf Seiten der Bauausführung für BIM-Nutzerinnen und BIM-Nutzer nicht nur zu erkennen, sondern auch positiv nutzen zu können, wurden insbesondere zwei Aspekte in den Fokus gerückt, die übergeordnet für zukünftige Ausbildungsinhalte mehr als relevant erscheinen. So sind es neben den Informatisierungsprozessen v. a. die neu ausgerichteten Kommunikationsvorgänge, die das Arbeiten auf Baustellen zukünftig mehr und mehr an einem zentralen Bauwerksinformationsmodell ausrichten. Dass die beiden Komponenten innerhalb der Methode BIM stark miteinander in Verbindung stehen, wird deutlich, wenn man das übergeordnete Ziel der Methode betrachtet, dass neben kooperativen, konsistenten und transparenten Aspekten insbesondere auch die interaktiven Abläufe – die wiederum stark an der Betrachtung des gesamten Lebenszyklus von Bauwerken orientiert sind – anvisiert. Auch für kleine und mittelständische Bauunternehmen sind mit diesen Erkenntnissen verbundene und aus unternehmensinterner bzw. baubetrieblicher Sicht meist komplett neue Ausrichtungen im Hinblick auf die in Abschnitt 4.1 thematisierten Wissensmanagement-Systeme überaus relevant, da nicht nur prozessbedingte Informationsweitergaben effektiv aufgegriffen und weitergeben werden müssen, sondern auch damit mögliche Datenfluten bewältigt werden können.

Online-Umfrage zur Verwendung digitaler Geräte auf Baustellen (Kapitel 5)

Die Online-Umfrage in Kapitel 5 hat in Anlehnung an einen aus bereits durchgeführten Studien ermittelten Status quo ergeben, dass weder innovative digitale Geräte, noch BIM-basierte Bauwerksinformationsmodelle auf Baustellen kleiner und mittelständischer Bauunternehmen eingesetzt werden. Diesbezüglich ist in erster Linie zu erwähnen, dass neben handelsüblichen Smartphones, Tablets oder Laptops nur sehr selten weitere digitale Arbeits- und Hilfsmittel Einsatz finden. Dies betrifft ebenfalls RFID-Transponder oder Drohnen, die lediglich vereinzelt in die Arbeitsprozesse eingebunden werden. Weder Augmented Reality, noch Bauroboter oder 3D-Drucker sind jedoch im Rahmen von Bauausführungen zu finden. Trotz der geringen Verbreitung entsprechender Geräte ist es auf Grundlage der weiteren Erkenntnisse des Forschungsvorhabens dennoch erforderlich, dass die anstehenden und vielfältigen Möglichkeiten in Ausbildungskonzepten Berücksichtigung finden. Diesbezüglich werden in Abschnitt 6.2 relevante Inhalte und potenzielle Konzepte zur Einbindung in berufliche Lehrpläne vorgestellt. Zuvor sind jedoch durch Rückgriff auf die in Abschnitt 1.1 verorteten Kernthesen, die mit diesen Aussagen verbundenen Erkenntnisse dargelegt und diskutiert.

Abgleich der gewonnenen Erkenntnisse mit den aufgestellten Kernthesen

Mithilfe der gewonnenen Erkenntnisse werden die vier grundlegenden Aussagen im Hinblick auf ihre Inhalte nachfolgend geprüft.

1. **Die Nutzung digitaler Arbeitsmittel auf Baustellen befindet sich aktuell noch im Anfangsstadium.**

Wie die Ergebnisse der Online-Umfrage in Abschnitt 5.4 gezeigt haben, ist eine Verbreitung digitaler Geräte und Werkzeuge in kleinen und mittelständischen Bauunternehmen noch nicht weit fortgeschritten. Lediglich Smartphones stellen mit einem Anteil von 96 % bisher eine sehr häufig genutztes Medium bereit. Viele weitere innovative Technologien, die zukünftig für Baustellenarbeitsprozesse immer relevanter werden, wie z. B. Laserscanner, RFID, Augmented Reality, 3D-Druck oder die Baurobotik, finden hingegen bei den befragten Unternehmen nur einen geringen bis gar keinen Einsatz. Im Rahmen der ersten Kernthese sei diesbezüglich insbesondere darauf hingewiesen, dass v. a. AR-Anwendungen und verschiedene Formen von Robotern zukünftig vermehrt in den Fokus zur Errichtung von Bauwerken rücken werden. Auch die Erkenntnisse, die aus den Fragen zur Informatisierung und zur Kommunikation gewonnen wurden, stützen die These, dass eine Nutzung digitaler Arbeits- und Hilfsmittel noch am Anfang steht. So finden bisher viele interaktive Abläufe noch über telefonische Kontakte oder durch die Verwendung von E-Mails, und weniger über weitere digital ausgerichtete Möglichkeiten, wie bspw. Cloud Computing, Video-Konferenzen oder zentrale Bauwerksinformationsmodelle statt. Gerade im Bezug zu BIM-Modellen sei zusätzlich angemerkt, dass mobile Endgeräte zwar bereits häufig genutzt werden, diese während der Arbeitsprozesse aber bisher noch nicht auf projektspezifische bzw. zentrale

Modelle zurückgreifen. Dies konnte im Rahmen der Online-Umfrage ebenfalls festgehalten werden, da keines der befragten Unternehmen entsprechende Modelle nutzt. Aufgrund der mannigfaltigen und in Zukunft immer weiter zunehmenden Einsatzmöglichkeiten der in dieser Arbeit dargestellten innovativen Technologien, kann abschließend konstatiert werden, dass es sich derzeit noch um ein anfängliches Stadium im Hinblick auf Implementierungen digitaler Arbeits- und Hilfsmittel auf Baustellen in Deutschland handelt.

2. **Die Automatisierungswahrscheinlichkeiten von Baustellentätigkeiten sind aufgrund nicht repetitiver Aufgaben gering.**

Aufgrund der Tatsache, dass Baustellenarbeitsprozesse stets an die zu errichtenden Bauwerke anzupassen sind, stellen insbesondere die damit verbundenen und immer unterschiedlich ablaufenden Aufgaben bzw. Tätigkeiten wesentliche Faktoren im Hinblick auf Ersetzbarkeiten auf Baustellen dar. Auch wenn viele Arbeitsschritte aktuell noch nicht direkt von Robotern übernommen werden können, so konnte im Rahmen des Forschungsvorhabens festgehalten werden, dass es v. a. die immer intensiver werdenden Mensch-Maschine-Interaktionen im soziotechnischen System Baustelle sind, die zukünftig vermehrt verschiedenartige Modifikationen hervorrufen. Dies betrifft für die Errichtung von Bauwerken insbesondere die Technologie der Augmented Reality sowie die immer häufiger stattfindenden Implementierungen verschiedener Bauroboter. Aufgrund der stets mannigfaltigen Bauvorhaben und der vielen unterschiedlichen Gewerke bzw. Bereiche im Bauwesen, sind Einbindungen zukünftiger digitaler Arbeits- und Hilfsmittel jedoch stets im Hinblick auf die auszuführenden Prozesse zu betrachten. So muss bspw. übergeordnet zwischen der Errichtung von Neubauten oder notwendigen Aufgaben im Bestandsbau unterschieden werden. Auch stellen die jeweils mit den örtlichen Gegebenheiten zusammenhängenden logistischen Rahmenbedingungen wesentliche Faktoren im Hinblick auf mögliche Einsätze digitaler Werkzeuge dar. Die mit den Implementierungen einhergehenden Substituierbarkeiten und Automatisierungswahrscheinlichkeiten können demnach nur in Relation zu den jeweiligen Arbeitsaufgaben bewertet werden. Zu den stets variierenden Projektvorgaben kommen zudem die in Abschnitt 3.4 aufgeführten branchenspezifischen Besonderheiten hinzu, die im Hinblick auf potenzielle Ersetzbarkeiten stets mit einbezogen werden müssen. Auch wenn Automatisierungen von Baustellentätigkeiten vorerst nur bedingt stattfinden, konnte im Rahmen des Forschungsvorhabens ebenfalls festgehalten werden, dass auch Cyberphysische Systeme für die Errichtung von Bauwerken in Zukunft möglich sind (s. Abschnitt 3.3.3). Insbesondere durch die Nutzung Künstlicher Intelligenz ergeben sich vielfältige Möglichkeiten zum autonomen Herstellen von Bauobjekten. Allerdings kommt es auch hier auf die notwendigen Prozesse an, die unter Berücksichtigung des abzuwickelnden Bauvorhabens notwendig werden.

3. **Die Informatisierungsprozesse auf Baustellen ändern sich durch die Digitalisierung grundlegend.**

Wie in Abschnitt 2.3 dargestellt, finden aufgrund verstärkter Anwendungen der Methode BIM nach und nach auch Modifikationen von Baustellenarbeitsprozessen statt. Durch die zunehmende Nutzung dreidimensionaler Bauwerksinformationsmodelle im Rahmen verschiedener Bauvorhaben werden vermehrt auch bauausführende Unternehmen auf entsprechende digitale Informationsquellen zurückgreifen. Das notwendige Abrufen objektrelevanter Planungsvorgaben vor Ort stellt dabei eine wesentliche Neuerung dar. Bisher wurden die meisten Informationen zur Errichtung von Bauwerken über zweidimensionale Ausführungszeichnungen an die Baustelle vermittelt, so dass die Angaben dort lediglich analog vorlagen. Mithilfe digitaler BIM-Modelle lassen sich zukünftig wesentliche Informationen jedoch auch in Echtzeit vor Ort abrufen. Je nach Baufortschritt können so bspw. verschiedene Bauteile prozessbezogen oder losgelöst von anderen Elementen dargestellt werden. Neben detaillierten Angaben zu einzelnen Baustoffen ist es darüber hinaus ebenfalls möglich Schnitte gezielt festzulegen oder Massen für Bestellungen einzusehen. Auch können BIM-Modelle auf Seiten der bauausführenden Unternehmen für das Stellen von Rechnungen, das Festhalten von Arbeitszeiten oder das Dokumentieren projektspezifischer Vorkommnisse herangezogen werden. Damit einhergehende Vorteile im Hinblick auf Kosten und Zeit können unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten ebenfalls als treibende Faktoren für zunehmende Anwendungen digitaler Modelle angesehen werden. Auch wenn v. a. kleine Bauunternehmen erst nach und nach mit zentralen Modellen arbeiten werden, so ist dennoch davon auszugehen, dass viele Bauausführende zukünftig vermehrt auf entsprechende digitale Informationsquellen zurückgreifen. Unterstützt wird diese Annahme ebenfalls dadurch, dass auch Vernetzungen einzelner Technologien verstärkt dazu führen, dass viele Informatisierungsprozesse zunehmend digital stattfinden. Dies betrifft neben dem Abrufen von Projektunterlagen auch die von Seiten ausführender Bauunternehmen vorzunehmenden Informationseinspeisungen bzw. Informationsweiterleitungen, z. B. in Form von Baustellendokumentationen. Auch finden viele Kommunikationsprozesse zukünftig vermehrt auf Grundlage von BIM-Modellen statt, so dass auch diesbezüglich Änderungen hervorgerufen werden, die nach und nach zu digitalen Abläufen führen.

4. **Die Einbindung digitaler Arbeitsmittel auf Baustellen findet eher langsam statt.**

Wie in Abschnitt 3.4 gezeigt, führen viele branchenspezifische Besonderheiten dazu, dass die Digitalisierung im Bauwesen – und insbesondere auch auf Baustellen – langsamer stattfindet als bspw. in Branchen mit stationären Fertigungsbedingungen. Neben der Herstellung von Unikaten – bei der v. a. die nicht routinemäßigen Tätigkeiten im Vordergrund stehen – zählen insbesondere auch die Wetterabhängigkeit und die Schmutzbelastungen zu den wesentlichen Faktoren, wenn es

darum geht digitale Arbeits- und Hilfsmittel verstärkt einsetzen zu können. Aber auch die im Bauwesen vorzufindenden und häufig fragmentierten Kommunikationswege, wie sie in Abschnitt 4.2 erläutert wurden, erschweren die Einbindungen innovativer Technologien. Implementierungen digitaler Neuentwicklungen unterliegen somit komplexen Ausgangsbedingungen bzw. Herausforderungen und werden erst nach und nach stattfinden. Auch die Frage zur Anschaffung digitaler Arbeits- und Hilfsmittel im Rahmen der Online-Umfrage hat gezeigt, dass viele Unternehmen noch nicht geplant haben, sich entsprechende Technologien zuzulegen. Anzumerken ist jedoch, dass es trotz langsam voranschreitenden Implementierungen wichtig ist, viele grundlegende Aspekte zur Digitalisierung auf Baustellen, so schnell wie möglich in beruflichen Lehrkonzepten zu berücksichtigen. Dass Baustellen zukünftig auch ohne menschliche Akteurinnen und Akteure auskommen können, wurde bereits in Abschnitt 3.3.3 erläutert. Ein mit diesen Visionen assoziierender Ausblick ist in Abschnitt 6.3 gegeben.

Anknüpfend an die Aussage zur notwendigen zeitnahen Einbindung möglicher Lösungsansätze im Rahmen beruflicher Ausbildungen von Baufacharbeiterinnen und Baufacharbeitern, werden nachfolgend wesentliche Schlüsselfaktoren aufgeführt, die v. a. im Hinblick auf die neue Rolle von BIM-Nutzer/-innen relevant werden (s. Abschnitt 6.2).

Übergeordnete Erkenntnisse und Schlüsselfaktoren

Bevor im nächsten Abschnitt Vorschläge zur Nutzung der gewonnenen Erkenntnisse für Inhalte bzw. Konzepte im Hinblick auf berufliche Bildungsprozesse aufgeführt sind, werden zuvor die wesentlichen Schlüsselfaktoren noch einmal rekapitulierend genannt.

In erster Linie kann festgehalten werden, dass notwendige Konstatierungen neuer Qualifikationen infolge der bevorstehenden Veränderungen aufgrund der Digitalisierung für zukünftige Prozesse auf Baustellen insbesondere aus der Methode des Building Information Modeling entstehen, die bestenfalls wiederum in der Berufsausbildung verankert sein sollte (vgl. Bernert 2016, S. 35; Baier & Díaz 2017, S. 32; Syben 2017, S. 20). Dies gilt im Bauwesen nicht nur für Beteiligte in Planungsphasen, sondern für alle weiteren Berufe und Berufsfelder der Bauindustrie und somit auch für das Bauhandwerk.

Für eine qualifizierte Beschäftigung von Baufacharbeiterinnen und Baufacharbeitern können die im vorliegenden Forschungsvorhaben analysierten Einflüsse und Auswirkungen der Digitalisierung bzw. der Methode BIM übergeordnet als maßgebliche Voraussetzungen für Rahmenlehrpläne von handwerklichen Berufsausbildungen angesehen werden. So ist im Hinblick auf die zunehmende Verwendung von zentralen Bauwerk-informationsmodellen insbesondere das Auslesen von Informationen, die disziplin- und gewerkeübergreifende Kommunikation, ein neues Rollenverständnis sowie das damit einhergehende Fachvokabular und das Erstellen digitaler Baudokumentationen für die Einbindung in handwerklichen Ausbildungen zu berücksichtigen. Neben den beiden im Vordergrund behandelten Aspekten der Informatisierung und der Kommunikation sind

im Hinblick auf mögliche berufsbildende Faktoren insbesondere bei den digitalen Arbeits- und Hilfsmitteln v. a. die Augmented Reality und die Baurobotik zu nennen. Die damit einhergehenden bzw. auch zunehmenden Mensch-Maschine-Interaktionen sind durch die Analyse der Besonderheiten auf Baustellen bzw. auch den Substituierbarkeiten und den Nicht-Routine-Tasks ebenfalls herausgestellt worden. Dass mit den mannigfaltigen Modifikationen neue Berufsbilder entstehen, wurde in Abschnitt 2.3 ebenfalls aufgegriffen, soll aber nachfolgend im Hinblick auf mögliche Ausbildungskonzepte noch einmal angerissen werden.

6.2 Übergeordnetes Fazit des Forschungsvorhabens

Bevor die wesentlichen Ausbildungsinhalte für Baufacharbeiterinnen und Baufacharbeiter benannt werden, sind aufbauend auf der vorangestellten Zusammenfassung weitere grundlegende Aspekte aufgeführt, die für das im vorliegenden Abschnitt verortete Fazit relevant sind. Beginnend mit resümierenden Erkenntnissen zu Rollen von Fachkräften auf Baustellen sind wesentliche Qualifikationen infolge Digitalisierung und BIM dargestellt. Über die Notwendigkeit zur Berücksichtigung der beruflichen Handlungsfähigkeit und des damit einhergehenden Arbeitsprozesswissens werden darauf aufbauend mögliche Lehrinhalte genannt, die im Rahmen beruflicher Ausbildungen heranzuziehen sind. Dies wird am Beispiel der beiden Berufsbilder zur *Mauer/-innen* und *Stahlbetonbauer/-innen* explizit dargestellt. Abschließend sind neben Beispielen für Lehrkonzepte ebenfalls übergeordnete Optionen im Hinblick auf Basis- bzw. Kernberufe angerissen.

Neue Rollen für Baufacharbeiter/-innen im Rahmen von BIM

Die innerhalb des Forschungsvorhabens diskutierten Änderungen durch vermehrte Einbindungen digitaler Arbeits- und Hilfsmittel auf Baustellen sowie die immer stärker zunehmende Anwendung von BIM wirken sich auch auf die im Bauwesen bekannten Rollenstrukturen aus. Insbesondere im Hinblick auf das Informationsmanagement sind Rollen im Rahmen der Bauausführung neu zu vergeben, damit die in den Planungsphasen entstandenen Vorgaben zur Herstellung von Bauwerken zukünftig von fachlich qualifizierten Personen übernommen werden können (vgl. VDI 2552-7 2018, S. 7). In letzter Konsequenz entstehen mit den neuen Rollen auch neue Berufsbilder (vgl. Borrmann et al. 2015, S. 12). Innerhalb der Methode sind dabei die handelnden Personen „ohne Zweifel der wichtigste Faktor bei der erfolgreichen BIM-Anwendung“ (VDI 2017, S. 6). Eine klare Definition einzelner Verantwortlichkeiten und Rollen ist hierbei nicht nur einer der ersten, sondern zugleich auch einer der notwendigsten durchzuführenden Schritte (vgl. Planen Bauen 4.0 2015a, S. 19; VDI 2017, S. 6).

Nach VDI 2552-7 (2018) beschreibt eine Rolle im Rahmen von BIM die Verantwortlichkeiten und Aufgaben einer Person oder Personengruppe innerhalb eines Projekts (vgl. ebd., S. 6). Die Definition einer solchen Rolle beinhaltet dabei die Beschreibung der erforderlichen Qualifikationen, aber noch keine Zuweisung an Individuen oder Einheiten. Rollen können innerhalb eines BIM-Projektes jedoch teil- oder kombinierbar sein. Bei der Teilbarkeit einer Rolle kann diese bspw. durch mehrere Personen wahrgenommen werden, während bei der Kombination von Rollen in einer Person auch mehrere Rollen zuweisbar sind. Neben der Rolle des *Informationsmanagers (BIM-Manager)*, des *Informationskoordinators (BIM-Koordinator)* und des *Informationsautors (BIM-Autor)* wird die für die Bauausführenden relevante Rolle des *Informationsnutzers (BIM-Nutzer)* vom *Verein Deutscher Ingenieure* empfohlen (vgl. ebd.).¹ Explizit handelt es sich per Definition bei einem BIM-Nutzer – wie bereits in Abschnitt 2.3 aufgegriffen – um ein Projektmitglied,

¹Auf weiterführende Aspekte zu den verschiedenen Rollen sei an dieser Stelle auf die Richtlinien-Reihe 2552 des VDI verwiesen.

welches das Datenmodell ausschließlich zur Informationsgewinnung nutzt, aber keine weiteren Eingaben vornimmt. Entsprechende für diese Prozesse notwendigen Qualifikationen werden nachfolgend auf Grundlage der bereits gewonnenen Erkenntnisse zuerst rekapitulierend bzw. übergeordnet dargestellt, bevor sie darüber hinaus auch im Hinblick auf explizite Lehrinhalte von Baufacharbeiterinnen und Baufacharbeitern eingegrenzt werden.

Qualifikationen für Baufacharbeiter/-innen infolge Digitalisierung und BIM

Unabhängig von expliziten bzw. berufsspezifischen Anforderungen kann im Hinblick auf die immer stärker werdenden Digitalisierungsprozesse festgehalten werden, dass viele Tätigkeiten von Fachkräften diverser Branchen immer komplexere Züge annehmen, die in Zukunft beherrscht werden müssen (vgl. Wolter et al. 2015, S. 42; Pfeiffer & Wesling 2016, S. 33; Apel & Apt 2017, S. 71; Bauer 2018, S. 7).² Im Bauwesen wirkt sich diesbezüglich v. a. die Methode BIM auf die notwendigen Qualifikationen und Kompetenzen fast aller Beteiligten aus (vgl. Syben 2017, S. 20; Wieselhuber 2018, S. 29). Stellenweise wird u. a. auch von *BIM-Kompetenzen* gesprochen (vgl. Prüser 2016, S. 70; Fredenlund 2017, S. 71). Insbesondere durch die Tatsache, dass es sich um eine völlig neue Vorgehensweise handelt, wird v. a. das für die Umsetzung der Methode notwendige Prozesswissen in Zukunft für viele Baubeteiligte – unabhängig davon, ob sie in der Planung, der Ausführung oder im Rahmen eines Betriebs von Bauwerken tätig sind – von übergeordneter Bedeutung sein (vgl. Prüser 2016, S. 69; Syben 2017, S. 20; Tautschnig et al. 2017, S. 359; Wieselhuber 2018, S. 29). Diese entsprechenden Kenntnisse zu Abläufen und projektzentrierten Vorgehensweisen können im Rahmen von BIM jedoch nicht ohne weitere Qualifikationen hinsichtlich Kommunikation, Kooperation, Kollaboration und einer damit verbundenen neuen Transparenz zum Einsatz kommen (vgl. Borrmann et al. 2015, S.565; Planen Bauen 4.0 2015a, S. 19; Syben 2017, S. 20; Wieselhuber 2018, S. 29 und S. 43; Lindemann & Syben 2019, S. 17 und S. 21). Auch eine übergeordnete Planungs-, Organisations- und Koordinationskompetenz geht mit einem Prozess- und Kommunikationswissen einher (vgl. Tautschnig et al. 2017, S. 359; VDI 2017, S. 2).

²Zu den relevanten branchenübergreifenden Anforderungen zählen u. a. der Umgang mit Hard- und Software, das Bewältigen von Datenfluten und Informationsüberflüssen, Flexibilität, Innovationsfähigkeit, Kreativität, Abstraktionsfähigkeit, Multitasking oder auch Problemlösefähigkeiten, Selbstmanagement, Verantwortungsbereitschaft, sowie Kenntnisse zu Organisations-, Arbeitsprozess- und Systemzusammenhängen oder auch damit einhergehende Interdisziplinaritäten, Kooperationen und Teamfähigkeiten. Entsprechende Aussagen können bspw. folgenden Quellen entnommen werden: Brater (2010, S. 818), Rauner (2014, S. 52), Schilcher & Diekmann (2014, S. 20 und S. 24), BMAS (2015, S. 29 und S. 64), Möller (2015, S. 4), Wolter et al. (2015, S. 15), Beck & Nagel (2016, S. 13), Dreher (2016, S. 74), Gayvoronskaya et al. (2016, S. 26), Hammermann & Klös (2016, S. 10), Jokovic & Stockinger (2016, S. 49-50), Krause (2016, S. 37), Pfeiffer & Wesling (2016, S. 33), Schönbeck (2016, S. 286), Spöttl (2016, S. 750), Apel & Apt (2017, S. 71), Bellmann (2017a, S. 7), BIBB (2017, S. 88-89), Ehrenberg-Silies et al. (2017, S. 8-9), Jordan (2017, S. 255), Krabel (2017, S. 102), Kruppe et al. (2017, S. 5-6), Nagl et al. (2017, S. 5), Potpara & Silbe (2017, S. 58), Wyrwal & Zinn (2017, S. 62), Dengler & Matthes (2018, S. 4 und S. 11), Faber & Mertens (2018, S. 6), Scheer & Wachter (2018, S. 86), Wolf et al. (2018, S. 130). Viele dieser Anforderungen werden nicht erst im Rahmen von Berufsausbildungen, sondern bestenfalls schon in grundlegenden Schulbildungen vermittelt.

Eng angelehnt an die genannten übergeordneten Qualifikationen spielt auch die im Kern des Forschungsvorhabens verortete Informatisierung für alle Beteiligten im Bauwesen zukünftig eine wesentliche Rolle (vgl. Borrmann et al. 2015, S. 12; Hausknecht & Liebich 2016, S. 15; Wieselhuber 2018, S. 43; Lindemann & Syben 2019, S. 19). So ist bspw. das bereits in Abschnitt 4.1 thematisierte Sender-Empfänger-Schema im Hinblick auf das Festlegen von Qualifikationen überaus relevant, da nicht nur neue Rollen im Rahmen von BIM entstehen (s. Abschnitt 2.3), sondern auch weil die Weitergabe und das Abrufen von Informationen diesbezüglich neue Anforderungen darstellen (s. Abschnitt 3.1.1 und Abschnitt 4.1). Damit einher geht bspw. auch eine Erklärbarkeit zu eingegebenen Daten, die für weitere Projektbeteiligte überaus wichtig sein können (vgl. Hartmann 2015, S. 54). Dass dafür neues Fachvokabular erforderlich ist, wurde bereits in Abschnitt 3.1.1 beschrieben (vgl. Beetz 2015, S. 167; VDI 2017, S. 2). Zu den Fachbegriffen gehören nicht nur übergeordnete Aspekte bei der Benutzung von Wörterbüchern, z. B. dem *buildingSMART Data Dictionary (bSDD)* oder von digitalen Bauteilkatalogen, sondern auch modell- bzw. prozessbezogene Vokabeln, wie bspw. das *BIM Collaboration Format (BCF)* oder die *Model View Definition (MVD)*. Beide Begriffe können hier exemplarisch als wichtige Lehrinhalte herangezogen werden. Über baustellenrelevante BIM-Kenntnisse hinaus sind ebenfalls Kenntnisse zu weiteren methodenrelevanten Ausdrücken durchaus sinnvoll. So sollten auch Fachbegriffe, wie *Level of Detail (LOD)*, *Level of Information (LOI)*, *BIM-Abwicklungsplan (BAP)* oder auch Aspekte zur Attributierung von Bauelementen im Digitalen Zwilling nicht nur bekannt sein, sondern bestenfalls auch stets projektübergreifend verstanden werden (vgl. VDI 2552-2 2018, S. 3-6).

Die mit BIM einhergehende Komplexität wird ebenfalls deutlich, wenn es zukünftig nicht nur darum geht Informationen auszulesen, sondern diese auch finden zu können. So setzen sich ausführungsrelevante Daten ggf. nicht nur aus Bauteilen, sondern auch aus Bauteilgruppen zusammen, denen wiederum verschiedene Informationen zugeordnet werden können (vgl. Prüser 2016, S. 68). Der Umgang mit den zuvor erwähnten Bauteilkatalogen ist diesbezüglich äußerst wichtig, da sich Inhalte nicht nur projektspezifisch ändern, sondern darüber hinaus auch objektübergreifend Anwendung finden. Grundlegende Kenntnisse über Informationsgewinnungen spielen somit im Hinblick auf die Konstatierung von Lehrinhalten eine große Rolle.

Eine ebenfalls damit einhergehende Qualifikation ist das Interpretieren von Daten und Informationen, die bspw. in einem BIM-Modell verortet sind. Denn selbst wenn alle geometrischen und semantischen Attribute an einem digital erstellten Bauteil vorhanden sind, müssen ggf. objektbezogene Aspekte sinnvoll zusammengebracht werden. Sollte ein Abrufen relevanter Informationen darüber hinaus infolge fehlender Angaben oder aufgrund mangelnder Erfahrung nicht möglich sein, ist es weiterhin wichtig, dass Beteiligte eines Projektes auf zusätzliche Datenbanken oder weitere Schnittstellen zurückgreifen können (vgl. Prüser 2016, S. 69; Syben 2017, S. 20; VDI 2017, S. 2; Wieselhuber 2018, S. 29). Stellenweise werden entsprechende Qualifikationen auch mit IT- oder expliziten Software-Kompetenzen zusammengebracht (vgl. Hausknecht & Liebich 2016, S. 176-177; Syben 2017, S. 20; Lindemann & Syben 2019, S. 19). Aufgrund einer großen Vielzahl

an unterschiedlichen Programmen sind solche Software-Kenntnisse im Rahmen von BIM jedoch vorerst auf disziplinspezifische Nutzungen zentraler Bauwerkinformationsmodelle auszurichten, z. B. im Hinblick auf Modellierungen während der Planung, auf mögliche Filterungen diverser Elemente vor Ort oder hinsichtlich übergeordneter projektbezogener Modellkontrollen zu verschiedenen Zeitpunkten (vgl. Hausknecht & Liebich 2016, S. 177; Prüser 2016, S. 69-70). Abschließend sei noch erwähnt, dass insbesondere aus gesellschaftlicher Sicht stets auch Qualifikationen hinsichtlich Umweltschutz, Nachhaltigkeit, Energieeffizienz, Sicherheit und Wirtschaftlichkeit auf Seiten aller Baubeteiligten vorhanden sein sollten (vgl. Planen Bauen 4.0 2015a, S. 36).

Durch die Verwendung digitaler Modelle können sich BIM-Nutzerinnen und BIM-Nutzer mithilfe zentral verorteter Daten bzw. Informationen jederzeit, z. B. anhand verschiedener Auswahlscenarien, notwendige Bauteile oder auch Prozesse anzeigen lassen, u. a. wenn Schalungen oder Bewehrungen durch Visualisierungen oder Farbcodierungen dargestellt werden sollen (vgl. Schreyer 2016, S. 37). Auch Mengenermittlungen, das Ableiten zweidimensionaler Pläne bzw. von Konstruktionsdetails sowie das Erstellen von Material- und Stücklisten können anhand eines Bauwerkinformationsmodells stattfinden (vgl. Borrmann et al. 2015, S. 5; Tulke & Schaper 2015, S. 416-417; Hausknecht & Liebich 2016, S. 14 und S. 76). Die Nutzung von BIM-Viewern, die zur Betrachtung, Filterung und teilweise auch zur Auswertung von Bauwerksmodellen herangezogen werden, sind dabei im Hinblick auf notwendige Qualifikationen in entsprechenden Untersuchungen mit einzu beziehen (vgl. Herre & Pfeiffer 2015, S. 527; VDI 2552-2 2018, S. 4). Auch die zuvor bereits erwähnte digitale Baufortschrittskontrolle, die im Rahmen von BIM bestenfalls in Form einer echtzeitnahen Dokumentation und ebenfalls mit entsprechender Software durchgeführt wird, erfordert im Hinblick auf *As-built-Modelle*, wie sie in Abschnitt 3.1.1 erläutert wurden, weitere wesentliche Qualifikationen auf Seiten der Bauausführenden (vgl. Gasteiger 2015, S. 124; Berger 2017, S. 13).

Eine Aussage des *Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI)* aus dem Jahre 2013, dass auf Baustellen ein so tiefer Einstieg in die BIM-Methodik und die neuen Softwarewerkzeuge nicht immer notwendig sei (vgl. BMVBS 2013, S. 40), kann unter Berücksichtigung der im Rahmen des Forschungsvorhabens gewonnenen Erkenntnisse nicht bestätigt werden.³ Ein Umgang mit stellenweise sehr komplexer BIM-Software, mit den dafür notwendigen mobilen Endgeräten und zusätzlich erforderlichen Grundkenntnissen zu Computern bzw. mit den jeweiligen Programmen wird, wie gezeigt, auch für Handwerkerinnen und Handwerker in Zukunft immer relevanter (vgl. Kölzer & Ranke 2014, S. 41; Gasteiger 2015, S. 71; Bach 2017, S. 12; Syben 2017, S. 20; Wieselhuber 2018, S. 29). Die ebenfalls stärker zunehmende Einbindung digitaler Arbeits- und Hilfsmittel – und die damit einhergehende vernetzte Interaktion mit Maschinen – führt zudem auch zur Notwendigkeit eines neuen Technologieverständnis auf Baustellen (vgl. Karl et al. 2017, S. 21 und S. 29; Brehm 2019, S. 93).

³Das *Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS)* wurde 2013 in das *Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI)* umbenannt.

Die hier kurz aufgeführten notwendigen Qualifikationen für zukünftige Baustellenarbeitsprozesse spiegeln sich im Rahmen möglicher Bildungsansätze zusammenfassend in der *Beruflichen Handlungsfähigkeit* wider, die nachfolgend im Hinblick auf mögliche Lehrkonzepte kurz angerissen wird.

Berufliche Handlungsfähigkeit und Arbeitsprozesswissen

Da die Digitalisierung insbesondere durch die Einbindung innovativer Arbeits- und Hilfsmittel in soziotechnischen Systemen verstärkte Mensch-Maschine-Interaktionen hervorruft, können die zuvor aufgeführten Fähigkeiten nicht nur als rein fachliche Qualifikationen – bspw. als losgelöste Bedienungen digitaler Geräte und Werkzeuge – betrachtet werden, sie müssen aufgrund kommunikativer Anforderungen v. a. in einem erweiterten branchenspezifischen Kontext Berücksichtigung finden. Neben persönlichen und fachlichen Kompetenzen sind diesbezüglich insbesondere soziale Qualifikationen von großer Bedeutung, die wiederum nicht nur im Hinblick auf die bereits auf Baustellen häufig vorkommenden Gewerkeschnittstellen bezogen werden können, sondern auch im Rahmen der zuvor mehrfach genannten kommunikativen Aspekte innerhalb der Methode BIM zunehmend beachtet werden sollten.

Der mit einer Konstatierung möglicher Schlüsselqualifikationen einhergehende Grundgedanke, in einzelne Berufe möglichst viele entsprechende Kernkompetenzen einzubauen bzw. diese in Berufsausbildungen zu vermitteln, stellt insbesondere im Hinblick auf einen stetigen Wandel von Berufs- und Arbeitswelten ein durchaus sinnvolles Konzept dar (vgl. Brater 2010, S. 824). So sollte vordergründig die Frage beantwortet werden, welche Kernanforderungen für die Ausübung eines Berufes unerlässlich sind (vgl. Dengler & Matthes 2015a, S. 11; Rauner et al. 2017, S. 18). Neben den häufig genannten *Fach-*, *Personal-* und *Sozialkompetenzen* ist es insbesondere die *Methodenkompetenz*, die zukünftig bei der Errichtung von Bauwerken eine immer größere Rolle spielen wird. Nimmt man alle vier Kompetenzen zusammen, so spricht man auch von der *Beruflichen Handlungsfähigkeit* (vgl. Klieme 2004, S. 10; Sonntag et al. 2012, S. 189; Rauner et al. 2017, S. 44).⁴

Da Auszubildende nach dem Ende ihrer Lehrzeit nachweisen müssen, dass sie über die in den Rahmenlehrplänen definierten beruflichen Fertigkeiten, Fähigkeiten, Qualifikationen und Kenntnisse verfügen, um somit letztendlich ihre Berufsfähigkeit nachweisen zu können (vgl. BBiG 2005, §1(3), S. 5; Becker & Spöttl 2008, S. 55; Rauner et al. 2017, S. 46), bleibt übergeordnet festzuhalten, dass die beiden Kernelemente der Informatisierung und der Kommunikation wesentliche Grundlagen für zukünftige Lehrinhalte bilden. Mit Fokussierung auf die Methodenkompetenz können in den Berufsausbildungen

⁴Einige Quellen – darunter auch die Kultusministerkonferenz – geben lediglich drei Dimensionen an. Siehe dazu bspw. KMK (1999, S. 4) oder Mytzek (2004, S. 20). Weitere Angaben zu den einzelnen Kompetenzen können folgenden Quellen entnommen werden: KMK (1999, S. 4-5), Zeller et al. (2004, S. 57), Sonntag et al. (2012, S. 189), Nikolaus & Seeber (2013, S. 169), Schlick et al. (2018, S. 115). Auch wird die Berufliche Handlungsfähigkeit stellenweise mit verschiedenen Formen von Kompetenzen verglichen oder auch mit Schlüsselqualifikationen bzw. Schlüsselkompetenzen zusammengebracht (vgl. Brater 2010, S. 825; Dostal 2013, S. 170; Rump 2018, S. 123).

diesbezüglich genau die Grundkenntnisse, Fertigkeiten und Verhaltensweisen entwickelt werden, die nicht nur entsprechende zeitgemäße Aspekte abdecken, sondern die ebenfalls einen möglichst großen Bereich von gemeinsamen Tätigkeiten umfassen (vgl. Meyser 2010, S. 66). Konkrete Lehrinhalte werden im vorliegenden Abschnitt noch aufgeführt.

Die notwendigen Fähigkeiten und Kompetenzen gehen darüber hinaus auch mit Aspekten von Wissen über Arbeitsprozesse und Organisationen einher (vgl. Krings & Fiedeler 2005, S. 120; Kölzer & Ranke 2014, S. 40; Schilcher & Diekmann 2014, S. 2 und S. 22). Das in Abschnitt 4.1 thematisierte Wissensmanagement leistet diesbezüglich nicht nur einen wesentlichen Beitrag zur Begriffsklärung der informationswissenschaftlichen Disziplin (vgl. Wiegerling 2015, S. 305), sondern bildet auch eine wichtige Grundlage im Hinblick auf mögliche Lösungsansätze. So ist es bspw. wichtig, dass Beziehungen zwischen Zeichen, Daten und Informationen nicht einfach losgelöst voneinander betrachtet bzw. auf separate Vorgänge bezogen werden, sondern dass im Rahmen interdisziplinärer Bezüge auch das Verhältnis zwischen Subjekt und Umwelt bzw. dem damit verbundenen Bewusstsein beachtet wird (vgl. Dick & Wehner 2006, S. 456; Rathswohl 2014, S. 19; Schilcher & Diekmann 2014, S. 6).

Als möglicher Lösungsansatz zur Berücksichtigung bereichsübergreifender Zusammenhänge kann im Hinblick auf qualifiziertes und erfolgreiches Handeln das in den Berufswissenschaften verankerte *Arbeitsprozesswissen* herangezogen werden.⁵ Per Definition sollte diese Form von Wissen „so angeeignet werden, dass in distanzierender und vergleichender Weise die Vielfalt gleichzeitig existierender Organisationsformen des Gesamtarbeitsprozesses [...] und die Gestaltung des Arbeitsprozesses sichtbar werden“ (Kruse 1986, S. 190). Anders ausgedrückt handelt es sich um ein übergeordnetes Verständnis von Gesamtarbeitsprozessen mit produktbezogenen, technischen, arbeitsorganisatorischen, sozialen und systembezogenen Dimensionen (vgl. ebd., S. 189), bei dem ein stetiges Analysieren, Durchdringen, Reflektieren und Begründen praktischer Handlungen stattfindet (vgl. Pittich 2010, S. 33). Durch damit verbundene Kenntnisse von Elementen eines vollständigen Arbeitsprozesses und deren Zusammenwirken wird ersichtlich, dass ein entsprechendes kontextbezogenes Wissen weit über ein kontextfreies bzw. theoretisches Wissen hinausgeht (vgl. Brater 2010, S. 817; Fischer 2006, S. 310; Rauner et al. 2017, S. 49).⁶ Beim Arbeitsprozesswissen handelt es sich demnach weder um allein stehende praxisorientierte Kenntnisse, noch um ein losgelöstes bzw. rein theoretisches Wissen, sondern vielmehr um die Kombination aus kontextbezogenem und handlungsleitendem Wissen (vgl. Becker & Spöttl 2008, S. 65; Rauner et al. 2017, S. 49). Es bildet somit eine wesentliche Grundlage, um notwendige berufliche Kompetenzen festzulegen, die bspw. für prinzipielle Ausbildungsinhalte oder für anzupassende Tätigkeiten im Rahmen komplexer Vorgänge bzw. im Hinblick auf qualifizierte und erfolgreiche Ausführungen relevant werden (vgl. Pittich 2010, S. 33; Rauner et al. 2017, S. 51).

⁵Die Einführung des Begriffs Arbeitsprozesswissen geht auf Wilfried Kruse aus dem Jahr 1986 zurück (vgl. Kruse 1986, S. 190; Pittich 2010, S. 33).

⁶stellenweise wird auch vom *Zusammenhangs-*, *Orientierungs-* oder *Überblickswissen* gesprochen (vgl. Fischer 2006, S. 308-309; Pittich 2010, S. 33; Bogner et al. 2014, S. 18; Rauner et al. 2017, S. 90).

Da gerade auf Baustellen – wie in Abschnitt 3.4 gezeigt – viele Probleme nicht nur situationsbezogen, sondern i. d. R. auch äußerst komplex sind, kann das Arbeitsprozesswissen als ausgerichtetes Prozessmanagement bzw. durch kompensatorische Prozessregulationen, wie z. B. durch die Vermeidung von Kollisionen im Rahmen der häufig sehr komplexen Kommunikations- und Kooperationsvorgänge, Abhilfe leisten (vgl. Fischer 2006, S. 313; Becker & Spöttl 2008, S. 111). Insbesondere im Bereich der gewerblich-technischen Facharbeit und im Hinblick auf die generelle Entwicklung beruflicher Handlungskompetenz spielt das Arbeitsprozesswissen somit nicht nur eine wesentliche Rolle, sondern es stellt bspw. für potenzielle Inhalte der beruflichen Bildung ebenfalls eine zentrale Wissenskategorie dar (vgl. Fischer 2006, S. 313; Rauner 2008, S. 123; Becker & Spöttl 2008, S. 105 und S. 110; Brater 2010, S. 817; Rauner et al. 2017, S. 49). Ein auf viele Faktoren ausgerichtetes Arbeitsprozesswissen sollte bspw. auf vernetztes und autonomes Handeln, auf anwendungsorientiertes Wissen, auf Interpretationen von Daten oder auch auf die Möglichkeit zur Einflussnahme bei der Gestaltung von Arbeitsorganisationen ausgerichtet sein (vgl. Zeller et al. 2004, S. 61; Fischer 2006, S. 309 und S. 313; Brater 2010, S. 818), um den veränderten Anforderungsprofilen von Baufacharbeiterinnen und Baufacharbeitern auch in Zukunft gerecht zu werden (vgl. Pittich 2010, S. 33).

Da berufliches Arbeitsprozesswissen also Zusammenhänge zwischen rein konzeptionellen Modellen der Arbeitsorganisation und der betrieblichen Interaktionspraxis vermittelt (vgl. Fischer 2006, S. 313), bietet es sich auch für Prozesse innerhalb der Methode des Building Information Modeling an. So kann – im Zuge leichter Begriffsabwandlungen – ein entsprechendes *Arbeitssystem-* oder besser *Arbeitsmethodenwissen* dabei helfen, soziotechnische Kontexte nicht nur besser verstehen, sondern diese auch zielgerichtet steuern bzw. modifizieren zu können (vgl. Becker & Spöttl 2008, S. 110).

Es sollte diesbezüglich zudem festgehalten werden, dass Systeme, in denen Menschen und Maschinen miteinander interagieren, zumindest in naher Zukunft immer noch auch auf menschliche Entscheidungsprozesse angewiesen sind, die wiederum stets auf dem Wissen der am Arbeitsprozess beteiligten Fachkräfte fußen. Um entsprechende Grundlagen bereits frühzeitig in berufliche Ausbildungen integrieren und die damit einhergehenden und notwendigen Kompetenzen frühzeitig fördern zu können (vgl. Becker & Spöttl 2008, S. 110), bieten sich verschiedene Konzepte an. Grundlage sind dabei stets die hier aufgeführten Aspekte, die vordergründig einem Verständnis von Gesamtarbeitsprozessen bzw. modernen Arbeitsabläufen dienen sollen und zunehmend auf produktbezogene, technische, arbeitsorganisatorische, soziale und systembezogene Dimensionen gerichtet sind (vgl. Fischer 2006, S. 309; Pittich 2010, S. 33). Bevor darauf aufbauende Konzepte vorgestellt werden, sind zuvor übergeordnete Inhalte bzw. Ziele für Ausbildungen von Baufacharbeiterinnen und Baufacharbeitern genannt, die ein Arbeitsprozesswissen im Rahmen digitaler Informatisierungsprozesse stark begünstigten. Im Anschluss daran werden explizite Ausbildungsinhalte der beiden zentralen Berufe im Massivbau, von *Maurer/-innen* und *Stahlbetonbauer/-innen*, unter die Lupe genommen.

Inhalte und Ziele von Rahmenlehrplänen im Bauwesen

Für die Definition eines Ausbildungsberufes müssen wesentliche Inhalte festgelegt werden, die eindeutige Zuordnungen beruflicher Tätigkeiten innerhalb eines normativen Rahmens ermöglichen (vgl. Rauner 2008, S. 128). Die in Deutschland staatlich anerkannten und größtenteils heterogenen Ausbildungsberufe unterliegen durch das Berufsbildungsgesetz (BBiG) und durch die Berücksichtigung der Handwerksordnung (HWO) einer solchen Regelung (vgl. Tiemann et al. 2008, S. 28). Das bedeutet für die in diesem Bildungssystem verorteten Ausbildungsberufe, z. B. *Maurer/-innen* oder *Stahlbetonbauer/-innen*, dass die notwendigen Qualifikationsanforderungen zur Ausübung beruflicher Tätigkeiten stets nach normativen Vorgaben zu definieren sind (vgl. Rauner 2008, S. 128).

Um ein möglichst gleiches Qualifikationsniveau für alle Auszubildenden eines Berufes zu gewährleisten, sind die später in der Praxis relevanten Inhalte zur Ausübung eines Berufes in der Ausbildungsordnung zu verankern (vgl. Vermehr 2016, S. 91). In diesen „Mindeststandards“ (ebd.) werden neben der Bezeichnung eines Ausbildungsberufes und der Festlegung der Ausbildungsdauer auch die relevanten Fertigkeiten und Kenntnisse für die Ausübung eines Berufes definiert (vgl. Brater 2010, S. 809; Vermehr 2016, S. 91). Die in der Ausbildungsordnung vorgesehenen Inhalte sollen dabei bestenfalls aus den Anforderungen der jeweiligen Berufs- und Arbeitswelten abgeleitet und so zusammengefasst werden, dass sie ein prägnantes Berufsprofil entstehen lassen. Dabei ist stets zu berücksichtigen, dass die zu vermittelnden Fähigkeiten an schnelle technologische Entwicklungen anzupassen sind (vgl. Vermehr 2016, S. 92). Dies ist v. a. im Hinblick auf festzulegende Lehrinhalte im Zuge voranschreitender Digitalisierung von übergeordneter Bedeutung.

Das zuvor erwähnte *Berufsbildungsgesetz* definiert als Ziel der Berufsausbildung das Erreichen der ebenfalls bereits erläuterten *Beruflichen Handlungsfähigkeit*. Diese Fähigkeit beruht wiederum auf den beruflichen Handlungskompetenzen, die dazu führen sollen, dass Auszubildende am Ende ihrer Lehre über die angesprochenen definierten beruflichen Qualifikationen und Kenntnisse verfügen (vgl. BGBl 1999, S. 1104; Becker & Spöttl 2008, S. 55; Rensing 2016, S. 7; Rauner et al. 2017, S. 44). Die während einer Ausbildung erworbenen Qualifikationen resultieren vordergründig aus den definierten Anforderungen in den Ausbildungsordnungen. Die Lehrinhalte stellen somit die Grundlage für die Ausführung beruflicher Aufgaben dar. Eine damit verknüpfte berufliche Handlungskompetenz soll letztendlich nach abgeschlossener Ausbildung zum selbstständigen Planen, Durchführen und Beurteilen von Arbeitsaufgaben im Rahmen einer Berufstätigkeit führen (vgl. KMK 2007, S. 12) und „ein verantwortungsbewusstes Denken und Handeln“ (ebd., S. 8) ermöglichen. Ein entsprechendes systemorientiertes und vernetztes Denken soll dabei insbesondere im Rahmen eines handlungsorientierten Unterrichts stattfinden (vgl. ebd., S. 17).⁷

⁷Diese Aspekte sind stark verknüpft mit den bereits behandelten Inhalten zur Informatisierung und Kommunikation in Abschnitt 4.1 und Abschnitt 4.2.

Die mit der Ausbildungsordnung verknüpften *Rahmenlehrpläne für die Berufsausbildung in der Bauwirtschaft* (s. KMK 1999) geben vor, dass die Voraussetzungen für eine qualifizierte Beschäftigung auf Baustellen in den Berufsschulen zu schaffen sind (vgl. ebd., S. 2). Zum Bildungsauftrag der Berufsschulen gehört somit eine Vermittlung der beruflichen Grund- und Fachbildung (vgl. KMK 2007, S. 4).⁸ Um die in den Rahmenlehrplänen aufgeführten Ziele zu erreichen, sind die Berufsschulen darüber hinaus aufgefordert Handlungskompetenzen inhaltlich zu betonen, berufs- und berufsfeldübergreifende Qualifikationen zu vermitteln und ein differenziertes und flexibles Bildungsangebot zu gewährleisten. Damit soll den unterschiedlichen Fähigkeiten und Begabungen sowie den jeweiligen Erfordernissen der Arbeitswelt und Gesellschaft Rechnung getragen werden (vgl. KMK 1999, S. 3-4; KMK 2007, S. 10). Diese berufsfeldübergreifenden Qualifikationen sind insbesondere im Hinblick auf die mit den Digitalisierungseffekten einhergehenden Änderungen hervorzuheben, da es für alle Baubeteiligten zukünftig immer wichtiger wird, zu wissen, wie andere Projektteilnehmerinnen und Projektteilnehmer mit den eigenen Tätigkeiten und Abläufen verknüpft sind und wie verschiedene objektbezogene Prozesse miteinander zusammenhängen. Generell weisen die Rahmenlehrpläne auf entsprechende, mit diesem Phänomen einhergehende Aspekte hin, indem sie nicht nur allgemeine Prozessverständnisse als übergeordnetes Ziel in Berufsschulen, sondern auch berufliche Flexibilitäten zur Bewältigung sich wandelnder Anforderungen in Arbeitswelt und Gesellschaft hervorheben (vgl. KMK 1999, S. 3; KMK 2007, S. 9). Alle in den Rahmenlehrplänen aufgeführten Inhalte und Ziele sind somit – wie oben bereits dargestellt – „auf die Entwicklung von Handlungskompetenz gerichtet“ (KMK 1999, S. 4). In Anlehnung an eine Aussage des *Büros für Technikfolgenabschätzung des Deutschen Bundestages* aus dem Jahre 2017, stellen die jeweiligen Rahmenlehrpläne im Hinblick auf zukünftige Kompetenzen und Qualifikationsanforderungen auch in Zukunft weiterhin die „Mindestinhalte zum Erreichen der formulierten Ziele“ (ebd., S. 7) bereit (vgl. Ehrenberg-Silies et al. 2017, S. 22)

Im Hinblick auf die nachfolgend dargestellten Möglichkeiten zur Implementierung der Erkenntnisse des Forschungsvorhaben in berufliche Bildungsinhalte, sei noch darauf hingewiesen, dass die Rahmenlehrpläne im Bauwesen seit 1999 auf einer berufsfeldbreiten Grund- und einer darauf aufbauenden Fachausbildung nach Lernfeldern strukturiert sind (vgl. Meyser & Uhe 2006, S. 150; KMK 2007, S. 4 und S. 17; Meyser 2010, S. 64; Syben 2012, S. 19). Die mit diesem Konzept einhergehende Ausrichtung in Berufsschulen und in überbetrieblichen Ausbildungen orientiert sich dabei ebenfalls stark an Handlungsfeldern und Arbeitsprozessen auf Baustellen (vgl. Syben 2012, S. 19). Im berufsschulischen Kontext können die im Unterricht vermittelten Lernfeldinhalte somit als thematisch zusammenhängende und aus der Praxis abgeleitete Einheiten aufgefasst werden (vgl. KMK 2007, S. 4 und S. 17).

⁸Im Unterschied zur Quellenangabe KMK (1999) (*Rahmenlehrpläne für die Berufsausbildung in der Bauwirtschaft*) handelt es sich bei KMK (2007) um eine *Handreichung für die Erarbeitung von Rahmenlehrplänen der Kultusministerkonferenz für den berufsbezogenen Unterricht in der Berufsschule und ihre Abstimmung mit Ausbildungsordnungen des Bundes für anerkannte Ausbildungsberufe*.

Nachfolgend sind bereits bestehende Ausbildungsinhalte bzw. Lernfelder der Berufsbilder *Maurer/-in* und *Stahlbetonbauer/-in* aufgeführt.⁹ Es werden Inhalte dargestellt, die vordergründig für Tätigkeiten auf Baustellen bzw. im Hinblick auf die Erstellung von Massivbauteilen relevant sind. Weitere Kenntnisse, z. B. hinsichtlich Abdichtungen, Arbeitsgerüsten, Baustoffbedarfen, Maßordnungen, Mörtelgruppen oder Wandaufbauten, werden nicht aufgeführt.¹⁰ Auch wenn es sich bei weiteren Inhalten um spezifische Fachkenntnisse für beide Berufsfelder handelt, so können die mit diesen Wissens-elementen einhergehenden Qualifikationen als zusätzliche theoretische Lehrinhalte angesehen werden, die für die Anpassungen infolge Digitalisierung nur bedingt modifiziert werden müssen.

Ausbildungsinhalte für Maurer/-innen nach Rahmenlehrplan

Das Berufsbild *Maurer/-in* beinhaltet im Wesentlichen die in Tab. 6.1 dargestellten Inhalte. Neben dem eigentlichen Mauern finden sich auch Arbeiten wieder, die nicht nur mit künstlichen Mauersteinen, sondern auch mit anderen Materialien, z. B. Stahlbeton oder Holz, in Verbindung stehen. So wird bspw. explizit das *Herstellen einer Holzkonstruktion* genannt, bei der nicht sofort ersichtlich wird, um welche Konstruktion es sich handelt. Aber auch beim *Herstellen eines Stahlbetonbauteils* oder einer *Massivdecke* kann davon ausgegangen werden, dass – wenn keine Systemschalung zum Einsatz kommt – mit Schalelementen aus Holz, z. B. Tafeln, Kanthölzern oder Holzlatten, gearbeitet wird.

Die in Tab. 6.1 aufgeführten Inhalte decken sich mit weiteren ausbildungsrelevanten Dokumenten. Dazu zählen u. a. die Angaben der *Bundesagentur für Arbeit* (vgl. Berufenet 2018), dem *Bundesgesetzblatt* (vgl. BGBl 1999, S. 1191) oder dem *Job-Futuromaten* des *Instituts für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung* (vgl. Futuromat 2019). Zusätzlich werden in diesen Quellen aber auch weitere Tätigkeiten, wie bspw. das Anbringen von Decken aus Fertigteilen, das Anfertigen von Sichtmauerwerk, das Mauern von Pfeilern oder das Herstellen von Mauerwerk nach spezifischen Verbandsarten aus künstlichen und natürlichen Steinen genannt. Neben den hier aufgeführten Angaben ist es jedoch überaus wichtig zu erwähnen, dass von den Fachkräften auf Baustellen auch diverse Maschinen, Geräte und Werkzeuge bedient werden müssen. Dazu zählen nicht nur Spachtel, Hämmer, Maurerkellen, Wasserwaagen, Alulatten oder Senklote (vgl. Berufenet 2018, o. S.), sondern auch verschiedene Hebezeuge oder Pressluft- bzw. Akkubohrhämmer.

Ergänzend zu den in Tab. 6.1 aufgeführten Ausbildungsinhalten sei auf weitere Fachkenntnisse im Rahmen von Lernfeldern hingewiesen. So ist es bspw. überaus wichtig, die betrachteten Aspekte des vorliegenden Forschungsvorhabens mit Inhalten zur Erstellung von Baustelleneinrichtungsplänen, der Vergabe von Bauleistungen oder Abrechnungsvor-

⁹Die Ausbildungsinhalte der KMK decken sich größtenteils mit den Lernfeldern für die beiden betrachteten Berufe (vgl. KMK 1999, Batran et al. 2014).

¹⁰Weitere Ausbildungsinhalte können bspw. in BGBl (1999), KMK (1999), Alber et al. (2014), Batran et al. (2014), Alber et al. (2017), Berufenet (2018) und BTB (2018) nachgelesen werden.

Tab. 6.1: Ausbildungsinhalte des Berufsbildes *Maurer/-in* nach den Rahmenlehrplänen für die Berufsausbildung in der Bauwirtschaft – Überschneidungen mit dem Berufsbild *Stahlbetonbauer/-in* sind fett dargestellt (eigene Tabelle in Anlehnung an KMK 1999, S. 15)

Ausbildungsinhalte des Berufsbildes <i>Maurer/-in</i>
Gründen eines Bauwerks
Mauern eines einschaligen Baukörpers
Herstellen einer Holzkonstruktion
Herstellen eines Stahlbetonbauteils
Beschichten und Bekleiden eines Bauteils
Mauern einer einschaligen Wand
Herstellen einer Massivdecke
Herstellen einer geraden Treppe
Mauern einer zweischaligen Wand
Überdecken einer Öffnung mit einem Bogen
Herstellen einer Natursteinmauer
Mauern besonderer Bauteile

gängen zu verknüpfen (vgl. Batran et al. 2014, S. 12). Änderungen infolge Digitalisierung wurden in Abschnitt 3.1.1 erläutert. Durch die Umstellung einer papierbasierten Planung und Ausführung auf modellzentrierte Vorgänge sind die hier aufgeführten Kenntnisse mit den nachfolgend aufgeführten expliziten Inhalten hinsichtlich BIM zu verschmelzen. Zuvor werden jedoch Ausbildungsinhalte zum Beruf *Stahlbetonbauer/-in* aufgeführt.

Ausbildungsinhalte für Beton- und Stahlbetonbauer/-innen nach Rahmenlehrplan

Das Berufsbild *Stahlbetonbauer/-in* beinhaltet übergeordnet die in Tab. 6.2 aufgeführten Aspekte. Bei den ersten acht Zeilen handelt es sich um die bereits zuvor erwähnten Überschneidungen mit dem Berufsbild *Maurer/-in*. Neben den dargestellten Gemeinsamkeiten sollte zusätzlich erwähnt werden, dass es sich bei allen weiteren aufgeführten Inhalten um Tätigkeiten handelt, die eine Verarbeitung des Materials Beton berücksichtigen.

Zusätzlich zu den in Tab. 6.2 aufgeführten Inhalten können – wie bei dem vorherigen Berufsbild auch – weitere relevante Ausführungstätigkeiten genannt werden. So gehört bspw. der Umgang mit Rahmen-, Großflächen- und Sonderschalungen ebenfalls zum Berufsbild von *Stahlbetonbauer/-innen*. Auch das Errichten von Stützen mit Konsolen, das Berücksichtigen von Balken-, Decken- und Kragplattenanschlüssen oder das Herstellen von Beton mit besonderen Eigenschaften sind wesentliche Vorgänge bzw. Bereiche im Rahmen von Prozessen mit Beton- und Stahlbetonverarbeitung (vgl. BGI 1999, S. 1194). Zusätzlich spielt gerade im Betonbau das Instandhalten und Sanieren eine

Tab. 6.2: Ausbildungsinhalte des Berufsbildes *Stahlbetonbauer/-in* nach den Rahmenlehrplänen für die Berufsausbildung in der Bauwirtschaft – Überschneidungen mit dem Berufsbild *Maurer/-in* sind fett dargestellt (eigene Tabelle in Anlehnung an KMK 1999, S. 15)

Ausbildungsinhalte des Berufsbildes <i>Stahlbetonbauer/-in</i>
Gründen eines Bauwerks
Mauern eines einschaligen Baukörpers
Herstellen einer Holzkonstruktion
Herstellen eines Stahlbetonbauteils
Beschichten und Bekleiden eines Bauteils
Mauern einer einschaligen Wand
Herstellen einer geraden Treppe
Herstellen einer Massivdecke
Herstellen einer Stahlbetonstütze
Herstellen einer Kelleraußenwand
Herstellen einer gewendelten Treppe
Instandsetzen eines Stahlbetonbauteils
Herstellen einer Stützwand
Herstellen eines Binders aus Spannbeton

wesentliche Rolle (vgl. ebd., S. 1195). Wie bereits beim Berufsbild *Maurer/-in* erläutert, finden sich auch beim Beruf *Stahlbetonbauer/-in* weitere relevante Lehrinhalte, die sich insbesondere mit Aspekten von BIM verknüpfen lassen.

Explizite Lehrinhalte für BIM-Nutzer/-innen

Im Hinblick auf eine umfängliche berufliche Handlungsfähigkeit auf Grundlage des zuvor erwähnten Arbeitsprozesswissens sind anknüpfend an die bereits dargestellten übergeordneten Inhalte für BIM-Nutzerinnen und BIM-Nutzer nachfolgend explizite Lehrinhalte genannt, die im Rahmen beruflicher Ausbildungen herangezogen werden sollten. Um zentrale Themen für Baufachkräfte nennen zu können, werden neben der Informatisierung und der Kommunikation ebenfalls wesentliche Phänomene des Building Information Modeling sowie die einzelnen digitalen bzw. innovativen Technologien als Ausgangsanforderungen betrachtet. Auch wenn weder auf Seiten von BIM, noch bei der Einbindung digitaler Arbeits- und Hilfsmittel alle Hintergründe bekannt sein können, so liefern diese Phänomene dennoch die entsprechenden Qualifikationsanforderungen an Baufacharbeiterinnen und Baufacharbeiter in einem digital ausgerichteten sozio-technischen System *Baustelle*. Zudem ist stets zu berücksichtigen, dass ein *Digitaler Zwilling* als zentrale Informationsquelle betrachtet werden sollte.

Um auf Informationen in BIM-Modellen zurückgreifen zu können, ist es erforderlich, dass Fachkräfte die für diese Prozesse notwendige Software heranziehen. Da eine genaue Festlegung von Applikationen aufgrund mannigfaltiger Programme jedoch bereits heute und auch in Zukunft schwierig zu bestimmen ist, wird auf eine explizite Nennung möglicher Software an dieser Stelle verzichtet. Wichtig ist jedoch der Hinweis auf die in Abschnitt 3.1.1 genannten *BIM-Viewer*, die schon vereinzelt auf Baustellen zum Einsatz kommen. Bei der Nutzung von digitaler Bausoftware finden v. a. mobile Endgeräte, zukünftig aber auch vermehrt Augmented Reality-Technologien Anwendung. Beide Arbeitsmittel können in erster Linie dafür verwendet werden, Bauelemente vor Ort darstellen zu lassen. Der eigentliche Umgang mit Augmented Reality und Software-Applikationen stellt jedoch i. d. R. keinen nennbaren Aufwand dar (vgl. VDMA 2016, S. 94 und S. 105), so dass er in Berufsausbildungen nur untergeordnet zu berücksichtigen ist.

Im Zusammenhang mit Informationseinblendungen kann auch die nachfolgende Qualifikation genannt werden. So ist es nicht nur wichtig, dass virtuelle Bauteile dargestellt werden, sondern auch, dass damit einhergehende Informationen von Baufachkräften vor Ort abgerufen bzw. eingesehen werden können. Dieser überaus wichtige Aspekt geht wiederum sehr stark mit dem bereits zuvor erwähnten Prozessverständnis einher. Unabhängig davon, ob Bauteilattribute mit mobilen Endgeräten oder mithilfe von Augmented Reality ausgelesen werden, theoretische Hintergründe sollten bei Baufachhandwerkerinnen und Baufachhandwerkern im Rahmen der Methode BIM stets vorhanden sein. Mit dem Abrufen von Attributen gehen ebenfalls potenzielle Rückgriffe auf Bauteilkataloge oder auf BIM-konforme Wörterbücher, z. B. dem *buildingSmart Data Dictionary*, einher. So ist es u. a. notwendig, dass Fachkräfte auf Baustellen auf projektübergreifende Informationen zurückgreifen müssen, bspw. wenn es um spezielle Baustoff- bzw. Materialangaben geht. Diesbezüglich ist es wichtig, dass Handwerkerinnen und Handwerker wissen, dass entsprechende Informationen zusätzlich abrufbar sind. Auch diese Aspekte sollten im Rahmen von Ausbildungsinhalten stets berücksichtigt werden.

Neben den bisher informatorisch ausgerichteten Qualifikationen handelt es sich bei dem nächsten Element um die zweite wichtige Grundlage im Rahmen von BIM. So ist die Kommunikation über zentrale Modelle im Hinblick auf einen optimierten Bauablauf von übergeordneter Bedeutung. Bei entsprechenden Vorgängen über zentrale Bauwerkkinformationsmodelle ist es jedoch auch hier unerheblich, ob mobile Endgeräte oder AR-Headsets verwendet werden. Viel relevanter ist es, dass alle Bauausführenden wissen, wie im Rahmen der Methode miteinander kommuniziert wird. Da auf Baustellen häufig Unvorhersehbarkeiten auftreten, kann im Rahmen entsprechender Austausch-Szenarien das entwickelte *BIM Collaboration Format (BCF)* herangezogen werden, mit dem wichtige Informationen über das zentrale Bauwerkkinformationsmodell teilbar sind. Die BIM-basierte Kommunikation stellt daher einen wesentlichen Kern im Hinblick auf notwendige Qualifikationen bzw. Lehrinhalte dar und sollte demnach in Berufsausbildungen berücksichtigt werden.

Baustellenbezogene Mitteilungen spiegeln sich auch bei der digitalen und bestenfalls echtzeitnahen Bauprozessdokumentation wider. So ist es zukünftig vordergründig wichtig, dass alle relevanten Vorgänge auf Baustellen – seien es geplante Abläufe oder auch Unvorhersehbarkeiten – festgehalten werden. Neben der Eingabe schriftlicher Informationen sind darüber hinaus auch verschiedene andere Angaben relevant, die sich bspw. durch das Verlinken von Fotos, Videos oder Scans darstellen. Ebenfalls können Bestätigungen in einem BIM-Modell vorgenommen werden, z. B. wenn ein Bauteil verbaut oder fertiggestellt wurde. Zuletzt sei noch einmal auf das neue Rollenverständnis hingewiesen, das mit den bereits zuvor thematisierten Aufgaben ebenfalls in Ausbildungen Berücksichtigungen finden sollte. So ist es nicht nur wichtig, dass sich Baufachkräfte im Rahmen der vielfältigen Prozesse verorten können, sondern insbesondere auch, dass sie die mit ihrer Rolle einhergehenden Aufgaben im Kontext zu weiteren Beteiligten verstehen.

Die im vorliegenden Abschnitt beschriebenen Lehrinhalte sind in Tab. 6.3 zusammenfassend aufgeführt. Bei den fett hervorgehobenen Angaben handelt es sich um Mindestanforderungen, die in handwerklichen Ausbildungen eingebunden werden müssen.

Tab. 6.3: Ausbildungsinhalte für Baufacharbeiter/-innen infolge BIM (eigene Tabelle)

Zusätzliche Ausbildungsinhalte für Baufacharbeiter/-innen infolge BIM
Rollenverständnis und damit verbundene Aufgaben (BIM-Nutzer/-in)
Kommunikation über zentrale BIM-Modelle (Kooperatives Arbeiten (BCF))
Explizites Auslesen relevanter Bauteilattribute
Digitale und echtzeitnahe Baudokumentation
Modellorientiertes Arbeiten (Digitaler Zwilling als zentrale Informationsquelle)
Umgang mit BIM-Viewern bzw. weiteren Software-Applikationen
Kenntnisse zu BIM-Grundlagen (z. B. AIA, BAP, IFC, BCF, IDM, MVD)
Umgang mit Bauteilkatalogen (z. B. buildingSmart Data Dictionary (bSDD))
Grundlegende Kenntnisse zu digitalen Arbeits- und Hilfsmitteln (z. B. AR, Robotik)

Die weiteren dargestellten Punkte sind darüber hinaus für eine vollumfängliche Berufliche Handlungsfähigkeit überaus zu empfehlen. Wie die hier aufgelisteten Inhalte in vorhandene Ausbildungskonzepte eingebunden werden können, z. B. in Berufsschulen oder in Ausbildungszentren, wird nachfolgend erläutert.

Berücksichtigung von BIM in handwerklichen Ausbildungen

Um Auszubildende auf zukünftige berufliche Aufgaben in Unternehmen vorzubereiten, ist eine solide Erstausbildung die Basis für die Bewältigung der anstehenden und vielfältigen Herausforderungen (vgl. Rauner 2014, S. 66; Jokovic & Stockinger 2016, S. 49; Kruppe et al. 2017, S. 6). Damit digitale Lernanwendungen in Kombination mit einem inhaltlich ausgereiften Konzept einen effektiven Beitrag leisten können (vgl. Rensing 2016, S. 6 und S. 10), sollten berufliche Inhalte – bestenfalls im Hinblick auf die zuvor

angesprochene Handlungsfähigkeit – intensiv trainiert werden (vgl. Rauner 2014, S. 54). Dies gilt v. a. für Lehr- und Lernkonzepte im Rahmen handwerklicher Ausbildungen, bei denen Auseinandersetzungen mit BIM bisher kaum zu finden sind (vgl. BMVBS 2013, S. 85; Hausknecht & Liebich 2016, S. 206; Fredenlund 2017, S. 72; Peters et al. 2017, S. 26; Syben 2017, S. 20). Auch wenn durch erste übergeordnete Ansätze, wie bspw. durch die Vorgaben der Richtlinienreihe 2552 des *Vereins Deutscher Ingenieure (VDI)*, entsprechende Notwendigkeiten erkannt wurden, dass auch BIM-Nutzerinnen und BIM-Nutzer in Qualifikationsprozesse eingebunden werden sollten (vgl. VDI 2552-8 2019, S. 4), sind viele weitere Institutionen und Unternehmen gefordert, die nächsten Schritte mitzugestalten.

Um notwendige Lehrinhalte nun in Kombination mit einer bestenfalls vollumfänglichen beruflichen Handlungsfähigkeit zu vereinen, sollten jedoch nicht nur einfach die im Rahmen des Forschungsvorhabens ermittelten Lehrinhalte rein theoretisch bzw. losgelöst von anderen Bildungsinhalten in Lehrplänen verortet werden, sondern vielmehr Berücksichtigung in BIM-basierte und verstärkt auf dispositive Arbeitsprozesse ausgelegte Konzepte finden (vgl. BMVBS 2013, S. 85; BMVI 2015, S. 14; Hausknecht & Liebich 2016, S. 206; Karl et al. 2017, S. 32). Eine der ersten Ideen, die in diesem Zusammenhang aufgegriffen werden kann, ist die Einbindung eines Faches *BIM*, in dem alle vermeintlich relevanten Inhalte verortet sind. So ist es bspw. denkbar, dass im Rahmen einer entsprechenden Lehreinheit alle theoretischen Komponenten – wie sie bereits ansatzweise in Abschnitt 2.3 angerissen wurden – thematisch aufgegriffen und in Bezug zu Baustellenarbeitsprozessen – ggf. je nach Gewerk – eingebunden werden. Innerhalb eines solchen Konzeptes können ebenfalls die beiden wesentlichen Kernelemente der Informatisierung und der Kommunikation, aber auch methodenrelevante Vokabeln sowie das Dokumentieren von Baustellenvorkommnissen, eingebunden werden.

Die mit der Methode BIM einhergehenden Zusammenhänge sollten jedoch auch in der handwerklichen Ausbildung bestenfalls nicht nur als eine reine Erweiterung bestehender Inhalte auf theoretischer Ebene betrachtet werden. Mit Rückblick auf das zuvor genannte berufliche Arbeitsprozesswissen reicht ein losgelöster Erwerb von Wissen nicht aus, um interdisziplinäre Anwendungskontexte komplexer Vorgehensweise holistisch zu vermitteln (vgl. Fischer 2006, S. 315; Becker & Spöttl 2008, S. 31). Ergebnisse der pädagogischen und psychologischen Forschung legen diesbezüglich nahe, Lehrpläne nach dem Konzept der Handlungsorientierung auszurichten bzw. das systemische und vernetzte Denken unter Einbeziehung relevanter Schlüsselqualifikationen zu berücksichtigen (vgl. KMK 2007, S. 17; Schönbeck 2016, S. 285; Bellmann 2017a, S. 7). Damit Handlungen auf Seiten der Baufachkräfte möglichst selbstständig ausgeführt und bestenfalls gedanklich nachvollzogen werden können, sollten Baustellenarbeitsprozesse durch Bezüge zu realen Anwendungszusammenhängen ebenfalls in entsprechenden Lehrkonzepten eingebunden werden (vgl. KMK 2007, S. 12; Schlick et al. 2018, S. 117). Berücksichtigt man darüber hinaus ebenfalls die Rollendefinition von BIM-Nutzerinnen und BIM-Nutzern, so können die vielfältigen Anforderungen unter interdisziplinären Aspekten – und auch im Hinblick auf adaptive Lernanwendungen, bei denen Angebote individualisiert und an

die jeweilige Situation des Lernenden anpassbar sind – stets aufgegriffen werden (vgl. Rensing 2016, S. 10). Mit entsprechenden subjektzentrierten Identifikationskonzepten sollte Auszubildenden v. a. vermittelt werden, dass sie sich durch die Fortführung und Pflege eines 3D-Modells auch auf digitaler Ebene direkt an der Erstellung der jeweiligen Bauwerke und damit ebenfalls an der Schaffung kultureller Mehrwerte beteiligen.

Vordergründig wichtig sind bei Nutzung von digitalen Modellen die in Abschnitt 4.1 analysierten Informatisierungsprozesse, bei denen bestenfalls alle vor Ort tätigen Fachkräfte Zugang zu den relevanten Ausführungsinformationen erhalten. Sollte wiederum nur eine Polierin oder ein Polier auf ein zentrales Modell zurückgreifen können, so wird nicht nur die geforderte Ausrichtung der Methode BIM, bei der möglichst alle Akteurinnen und Akteure an den Prozessen beteiligt werden, umgangen, sondern auch riskiert, dass wertvolle Informationen verloren gehen. Hat stets nur ein Vorarbeiter Zugriff auf projektrelevante Daten bzw. Ausführungsunterlagen, können sich andere Baufachkräfte ggf. weniger einbringen und darüber hinaus auch in Fällen von Krankheit, Urlaub oder abrupten Baustellenwechseln nicht ohne zusätzliche Hürden im Hinblick auf Einweisungen oder Übergaben einspringen. Eine universelle Nutzung von BIM-Modellen sollte somit für alle Beteiligten zu jeder Zeit möglich sein. Entsprechende grundlegende Fähigkeiten sind demnach bereits frühzeitig in beruflichen Ausbildungen zu berücksichtigen. Ein Umgang mit der Wichtigkeit von Informationen sollte sich dabei jedoch bestenfalls nicht nur auf das Abrufen bzw. Verorten einzelner Daten in einzelnen BIM-Modellen beschränken, sondern darüber hinaus auch auf die in Abschnitt 4.1 behandelten Wissensmanagement-Prozesse innerhalb von Bauunternehmen beziehen (vgl. Dick & Wehner 2006, S. 459) – auch weil Auszubildende in Betrieben häufig nur Teilaufgaben der umfangreichen betrieblichen Arbeitsprozesse übernehmen, so dass ein tieferes Verständnis für Gesamtprozesse nur selten vermittelt wird (vgl. Rensing 2016, S. 8).

Auch dem Prinzip der Vernetzung müssen Aus- und Weiterbildungskonzepte Rechnung tragen und ihm gleichzeitig Ausdruck verleihen (vgl. Beck & Nagel 2016, S. 15). Betriebe, Berufsschulen und Bildungszentren könnten diesbezüglich in Form verschiedener Kooperationen zusammenarbeiten, um ihre Lerninhalte zu verknüpfen bzw. um gegenseitig von Erfahrungen zu profitieren (vgl. Gensicke et al. 2016, S. 50; Pfeiffer & Wesling 2016, S. 35). Da insbesondere die Berufsschule ein Ort der Systematisierung, der konzeptionellen Vorbereitung und Nachbereitung sowie der Theoretisierung praktischen beruflichen Lernens und Tuns ist (vgl. Pittich 2010, S. 33), können viele der hier skizzierten Lehrinhalte in entsprechenden Ausbildungsstätten untergebracht werden. Ergänzend zu den zuvor aufgeführten Kernqualifikationen und weiteren zentralen Bildungselementen, sind in Anlehnung an Angaben des *Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung* aus dem Jahr 2013 auch für BIM-Ausbildungen im Bauhandwerk übergeordnet zentrale Ausbildungsschwerpunkte sinnvoll (vgl. BMVBS 2013, S. 109). Dies betrifft u. a. eine anfängliche Einführung zu BIM und eine damit einhergehende Übersicht zu wesentlichen Grundsätzen und Prozessen. Neben einer Einordnung des zentralen und digitalen Modells sind es darüber hinaus auch viele weitere übergeordnete Aspekte, die bestenfalls berücksichtigt werden sollten. Dazu zählen bspw. Potenziale, Risiken, Erwartungen, Auf-

wandsverlagerungen, Richtlinien oder vertragliche Grundlagen der Methode. Kongruent zu den im vorliegenden Forschungsvorhaben aufgeführten Inhalten sollten explizit die bereits mehrfach erwähnten Verantwortlichkeiten und Aufgaben, sowie die mit BIM einhergehenden Anforderungen und Prozesse im Hinblick auf fachspezifisches, aber auch auf fachübergreifendes Arbeiten berücksichtigt werden. Neben der Bedienung verschiedener Software – allen voran den unterschiedlichen BIM-Viewern – sollten die damit verknüpften Prozesse der Technologien – und insbesondere auch der Schnittstellen – Einzug in berufliche Bildungsprozesse erhalten (vgl. ebd.).

Im Hinblick auf die mehrfach angesprochene interdisziplinäre Arbeitsweise im Rahmen der Methode BIM sollten Lehrbeispiele sinnvollerweise frühzeitig an möglichst realitätsnahen Projekten erprobt werden. Da Building Information Modeling auf internationaler Ebene bereits länger gelehrt wird als in Deutschland, kann die Betrachtung bestehender Lehrkonzepte, – wie sie bspw. in den Vereinigten Staaten zu finden sind – durchaus sinnvoll sein (vgl. Brokbals & Čadež 2017, S. 855). So wurde BIM in den USA bereits im Jahr 2002 in die Lehrpläne einzelner Hochschulen integriert. Unter rein theoretischen Konzepten fanden sich auch disziplinübergreifende Ansätze (vgl. ebd.). Die Umsetzung entsprechender interdisziplinärer Konzepte, bei dem zwei oder mehr Fachdisziplinen beteiligt sind, kommen auch für die Ausbildung im Handwerk, bei dem – wie in Abschnitt 3.4 aufgeführt – per se mehrere Gewerke berücksichtigt werden sollten, in Frage. Insbesondere bei der Einbindung verschiedener Parteien können für realitätsnahe Ansätze v. a. Projektarbeiten genannt werden, die auch in den Lehrkonzepten der mannigfaltigen Ausbildungen im Bauwesen verortet und angewandt werden sollten. Als potenzielle Lehrinhalte für BIM-Nutzerinnen und BIM-Nutzer bieten sich diesbezüglich im Zentrum angesiedelte digitale Beispielmuster sehr gut an. Mithilfe fiktiver Übungsprojekte können bspw. nicht nur einzelne Szenarien, sondern v. a. auch die überaus wichtigen Kommunikationsprozesse anhand grundlegender Faktoren bzw. im Hinblick auf eine gemeinsame Projektabwicklungen durchgespielt werden. So sollte der Fokus bestenfalls auf die Erstellung der bereits zuvor erwähnten *As-built*-Modelle gelegt werden, um wesentliche Abläufe und Vorgänge an fiktiven Objekten zu erproben.

Als lernfeld- oder aber auch als gewerkeübergreifendes Projekt kann an dieser Stelle exemplarisch die Errichtung eines Einfamilienhaus herangezogen werden. Beginnend mit einem Rohbau sind bspw. ebenfalls auch alle weiteren Gewerke bei entsprechenden fiktiven, aber dennoch konkreten Bauvorhaben implementierbar. Eine damit einhergehende kooperative Bearbeitung sollte in diesen Fällen bestenfalls durchgehend EDV-gestützt umgesetzt werden, vorzugsweise unter Einbeziehung von Austauschplattformen (vgl. Pfeiffer & Wesling 2016, S. 35; Karl et al. 2017, S. 29). Entsprechende *Clouds* werden bereits in einigen Schulen zum Informations- und Datenaustausch eingesetzt, so dass vielerorts auf eine vorhandene Infrastruktur zurückgegriffen werden kann (vgl. Karl et al. 2017, S. 29). Auch spiegelt die Verwendung solcher Kommunikationsplattformen die im Rahmen von BIM wichtige Nutzung eines *Common Data Environments* wider. Ein Umgang mit dem *BIM Collaboration Format*) ist darüber hinaus – im Hinblick auf die vielfältigen Kommunikationsprozesse innerhalb der Beispielprojekte – obligatorisch.

Neben den hier dargestellten übergeordneten und expliziten Lehrinhalten finden sich zudem auch viele Möglichkeiten zur Einbindung digitaler Innovationen und Werkzeuge für handwerklich ausgerichtete Lehr- und Lernprozesse innerhalb beruflicher Bildungsprozesse wieder. Mithilfe von Smartphones können Auszubildende bspw. im Rahmen eines fiktiven Projektes verschiedene Arbeitsaufträge einsehen oder je nach Aufgabenfeld aufgefordert werden, diverse Fertigstellungen oder mögliche Probleme mit Hilfe von Texten, Bildern oder Videos zu dokumentieren (vgl. Rensing 2016, S. 8).

Auch ist an vielen Stellen die Nutzung von Virtual Reality-Anwendungen in der beruflichen Ausbildung möglich und überaus sinnvoll (vgl. Kölzer & Ranke 2014, S. 42; Erlebach & Hoch 2017, S. 20). So können im Rahmen von Trainingsprogrammen – ähnlich den Flugsimulatoren für Pilot/-innen oder den Maschinensteuerungen für Baugeräteführer/-innen – bspw. durch Simulationen, durch visuelles und auditives oder auch durch kommunikativ ausgerichtetes Lernen, verschiedene Kompetenzen gefördert werden (vgl. Beck & Nagel 2016, S. 16; Behrendt 2016, S. 45; Rensing 2016, S. 10). VR-Programme ermöglichen es, im Rahmen authentischer Problemlöse- und Arbeitsprozesse und durch virtuelle Experimente, reale Zusammenhänge unter kontrollierten, kostengünstigen und gefahrlosen Bedingungen durchzuführen, nachzuvollziehen, zu veranschaulichen und zu üben (vgl. Bach 2017, S. 12). Auftretende Fehler im Programm können bestenfalls im Vorfeld erkannt und teure Kollisionen vermieden werden.

Explizit für das Bauwesen sind bei Nutzung von Virtual Reality-Anwendungen bspw. Explosionsansichten, geplante und tatsächliche Bauabläufe, Schnittebenen oder transparente Objekte von Interesse (vgl. Tulke & Schaper 2015, S. 417; Morrison 2018, o. S.). Unter Verwendung der hier skizzierten Möglichkeiten können im Rahmen integrierter Lernkonzepte, wie bspw. dem *Blended Learning*, in simultanen Welten mithilfe des *Serious Gaming* vielfältige und realitätsnahe Baustellenarbeitsprozesse durchgespielt werden (vgl. Behrendt 2016, S. 43; Gensicke et al. 2016, S. 48, S. 62 und S. 78; Bellmann 2017b, S. 3). Um die aufgeführten Vorteile jedoch nutzen zu können, ist es obligatorisch, dass Berufsschulen und überbetriebliche Ausbildungsstätten nach und nach mit VR- und AR-Anwendungen ausgestattet werden. Dies ist – vergleichbar mit Anschaffungen von Laser- oder RFID-Scannern – durchaus mit einem relativ geringen Aufwand möglich. Im Hinblick auf Nutzungen additiver Fertigungsverfahren oder beim Einsatz von Baurobotern sind hingegen erhebliche Kostenaufwendungen zu erwarten. Die Ausstattung von Berufsschulen und überbetrieblichen Ausbildungsstätten wird sich somit vorläufig auf die Nutzung mobiler Endgeräte (Smartphones und Tablets) und Computergenerierter Realitäten (Virtual Reality und Augmented Reality) beschränken.

Die Rolle von BIM-Nutzer/-innen als möglicher Basis- bzw. Kernberuf

Anknüpfend an die potenziellen Konzepte, die in beruflichen Ausbildungen zum Tragen kommen können, soll an dieser Stelle kurz angerissen werden, dass über diese meist institutionsinternen Vorschläge hinaus ebenfalls ein weiteres, eher übergeordnetes Konzept zur Berücksichtigung von BIM in handwerklichen Ausbildungen in Betracht gezogen

werden kann. So ist es v. a. im Hinblick auf neue Rollen im Zuge der Implementierung der Methode durchaus sinnvoll, über mögliche neue Ausrichtungen bzw. Berufsbezeichnungen nachzudenken. Entsprechende existierende Ansätze – die bisher jedoch noch nicht auf digitale Arbeitsprozesse ausgerichtet waren – gab es im Handwerk bereits durch die Schaffung des Berufs *Hochbaufacharbeiter/-in*. Im Rahmen dieses Berufsbildes können viele Fertigkeiten und Kenntnisse zusammengeführt werden, die sich bspw. nicht nur mit Lehrinhalten von *Maurer/-innen* oder *Stahlbetonbauer/-innen*, sondern auch mit vielen anderen handwerklichen Ausbildungen decken. So beschreibt das Berufsbild viele gewerkeübergreifende bzw. baustellenrelevante Aspekte, z. B. das Lesen von Zeichnungen, das Bearbeiten verschiedener Hölzer, das Herstellen von Bauteilen aus Stahlbeton oder von Baukörpern aus Steinen, das Einbauen von Dämmstoffen, das Herstellen von Putzen und Estrichen sowie das Verlegen von Fliesen und Platten oder das Herstellen von Bauteilen im Trockenbau (vgl. BGBl 1999, S. 1105). Da viele der hier beispielhaft genannten Fertigkeiten auch in anderen separaten Berufsbildern im Handwerk verortet sind, ist im Hinblick auf gemeinsame Lehrinhalte zu überlegen, ob entsprechende Kernelemente nicht in der zuvor dargestellten Rolle als BIM-Nutzer/-innen zusammengefasst werden können bzw. sollten.

Die hier kurz angerissene Tatsache, dass viele Arbeitsprozesse und Organisationsformen in verschiedenen Berufen wesentliche Gemeinsamkeiten aufweisen (vgl. Meyser & Uhe 2006, S. 151), führt letztendlich zu Überlegungen, ob mithilfe von Verschmelzungen kompakte Kern- bzw. Basisberufe alternative bzw. sinnvolle Konzepte darstellen (vgl. Rauner 2005, S. 150).¹¹ Dies ist v. a. im Zuge des Paradigmenwechsels und der damit einhergehenden mannigfaltigen und komplexen Bedingungen sehr vielversprechend. Potenzielle Kernberufe können – insbesondere auch durch selbstständiges berufliches Handeln in unvorhersehbaren Situationen – viele arbeitsprozessrelevante Aspekte abdecken (vgl. Rauner 2005, S. 150; Brater 2010, S. 826). Allerdings sei auch angemerkt, dass durch die Schaffung eines zu breit angelegten Berufsfeldes die Gefahr besteht, dass mit einem zu hohen Anteil an übergreifendem und kontextunabhängigem Wissen auch Nachteile entstehen können, z. B. wenn klare Berufsprofile verloren gehen (vgl. Trede & Lüthi 2018, S. 15).

Bevor im letzten Abschnitt weiterer Forschungsbedarf aufgezeigt wird, soll abschließend noch einmal festgehalten werden, dass es im Hinblick auf zukünftige digitale Baustellenarbeitsprozesse nicht nur darum geht, branchenspezifische Software bedienen zu können, sondern vielmehr, dass Informationen von den Beteiligten auf Baustellen problemlos ausgelesen und effektiv genutzt werden können. Mit den mannigfaltigen Prozessen zu Datengewinnungen gehen neben den bereits zuvor genannten Aspekten der Kommunikation ebenfalls notwendige Kenntnisse zu Prozessabläufen und zu digitalen Baudokumentationsvorgängen einher. Die übergeordnete und wesentliche Erkenntnis liegt damit

¹¹Die Diskussion um Einführungen von Mono-, Kern- oder Basisberufen ist nicht erst seit dem Phänomen der Digitalisierung Thema berufswissenschaftlicher Forschung (vgl. Rauner 2005, S. 148-149; Becker & Spöttl 2008, S. 210; Meyser & Uhe 2006, S. 151; Brater 2010, S. 822).

einhergehend klar in der Notwendigkeit zu einer umfangreichen Auseinandersetzung der Bauausführenden mit grundlegenden Komponenten der Methode BIM, die zukünftig in allen Berufsausbildungen vorgesehen werden sollte. Bindet man digitale Abläufe von Informationsgewinnungen bereits in der beruflichen Erstausbildung ein, so können die in Abschnitt 2.3 genannten Vorteile der Methode BIM, z. B. hinsichtlich Wirtschaftlichkeit, Qualität oder Transparenz, über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks sinnvoll genutzt werden.

6.3 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

Aufbauend auf den gewonnen Erkenntnissen des vorliegenden Forschungsvorhabens ist es nicht nur erforderlich, dass die zuvor genannten Qualifikationen bzw. Lehrinhalte bestenfalls zeitnah und gewerkeübergreifend in Lehrplänen bzw. Lehrkonzepten Berücksichtigung finden, sondern auch, dass aufbauend auf den thematisierten Inhalten weitere Untersuchungen durchgeführt werden. Da dies nicht nur aus rein wissenschaftlicher Sicht erforderlich ist, werden nachfolgend zuerst Maßnahmen aufgeführt, die insbesondere von politischer Seite in Betracht gezogen werden sollten. Über damit einhergehende gesellschaftlich übergeordnete Entscheidungen hinaus, ist es zudem wichtig, dass auch aus unternehmerischer bzw. wirtschaftlicher Sicht notwendige Schritte einzuleiten sind. Bevor entsprechende Maßnahmen aufgeführt werden, ist angelehnt an die digitalen Neuentwicklungen aus Abschnitt 2.4 dargestellt, wie Baustellen auch ohne menschliche Facharbeiterinnen und Facharbeiter auskommen könnten. Neben einer qualitativen Trendextrapolation werden in Anlehnung an Abschnitt 3.3.3 insbesondere potenzielle autonome Systeme skizziert.

Trendextrapolation für das Bauwesen

Auch wenn an einigen Stellen verneint wird, dass in Zukunft Roboter und 3D-Drucker in der Lage sein werden das Bauen zu übernehmen (vgl. Frick & Tenger 2015, S. 18), so haben die Erkenntnisse des vorliegenden Forschungsvorhabens gezeigt, dass robotergestützte Tätigkeiten – entsprechenden Aussagen entgegenwirkend – sogar in großem Umfang möglich sind. Trotz zurückhaltender Implementierungsvorgänge im Vergleich zu anderen Branchen, kann somit davon ausgegangen werden, dass auch Baustellen sehr starke Veränderungen infolge Digitalisierung erfahren. Beispielsweise ist zu erwarten, dass sich der Bauprozess von der vorherrschenden örtlichen Fertigung hin zu einer eher logistisch geprägten Montage vorgefertigter Elemente wandelt (vgl. Glock 2018, S. 619). Dieser Tatsache anschließend kann ebenfalls angenommen werden, dass sich der digitale Wandel auch im Bauwesen exponentiell mit so hohem Veränderungsdruck entwickeln wird, dass sich Fertigstellungszeiten um bis zu 30 % verkürzen (vgl. ebd., S. 621).

Betrachtet man darüber hinaus explizit verschiedene der in Abschnitt 2.4 dargestellten digitalen Arbeits- und Hilfsmittel, so kann bspw. mithilfe des *National BIM Survey* aus dem Jahr 2019 ebenfalls festgehalten werden, dass viele Beteiligte der britischen Bauindustrie bereits in naher Zukunft mit einer Einbindung bzw. Nutzung von Cloud Computing (89 %), von Computergenerierten Realitäten (75 %) oder von 3D-Druckern (75 %) rechnen (vgl. NBS 2019, S. 23). Auch der zuvor angesprochene und sehr wahrscheinliche Einsatz von Baurobotern wird in der Studie mit 32 %-iger Wahrscheinlichkeit im Jahr 2024 – ebenfalls auf Annahmen von Baubeteiligten beruhend – angegeben. Eine damit einhergehende Mensch-Maschine-Interaktion wird sogar mit 43 % erwartet und mögliche Cyberphysische Systeme zeigen mit Abschätzungen von 65 % ebenfalls eine starke Tendenz auf (vgl. ebd.). Im Hinblick auf die Verwendung digitaler Technologien kann einer Studie aus Österreich entnommen werden, dass zwar viele zukünftige

Anwendungen heute noch gar nicht abschätzbar sind, aber dass es v. a. durch Building Information Modeling schon bald sehr wahrscheinlich ist, dass öffentliche Ausschreibungen bzw. Baueinreichungen digital umgesetzt werden (vgl. Goger et al. 2018, S. 129-130). So ist der Studie zufolge in naher Zukunft eine Abwicklung von 80 % aller Neubauprojekte mit BIM möglich (vgl. ebd., S. 130).

In Anlehnung an die bereits in Abschnitt 3.2.2 thematisierten Etappen der Digitalisierung finden verschiedene Stufen in den nächsten Dekaden statt (vgl. PWC 2018, S. 1). Im einem ersten Schritt kann davon ausgegangen werden, dass eine bereits existierende *Algorithm Wave* aktuell dazu führt, dass aufgrund anfänglicher digitaler Prozesse auf Baustellen ein erstes Herantasten bzw. ein langsames Einbinden neuer Arbeits- und Hilfsmittel stattfindet. In einem Zeitraum von ca. zehn Jahren wird die Zunahme entsprechender Geräte immer weiter zunehmen, so dass bereits mittelfristig mit ansteigenden Mensch-Maschine-Interaktionen zu rechnen ist. Bei der nächsten Stufe sorgen bereits vielfach eingebundene digitale Werkzeuge für eine zunehmend verbreiterte Anwendung entsprechender Geräte auf Baustellen. Die für diesen Zustand notwendige *Augmentation Wave* führt dabei zu einer erhöhten Mensch-Maschine-Interaktion, in der bereits viele verschiedene Innovationen selbstverständlich bei der Erstellung von Bauwerken angewendet werden. Im Zuge der darauf folgenden *Autonomy Wave* findet schließlich ein weiterer Schritt zu einem bis dahin bereits stark auf autonomen Prozessen beruhenden soziotechnischen Systems *Baustelle* statt. Es handelt sich durch eine fast flächendeckende Einbindung von Maschinen und Robotern zu diesem Zeitpunkt bereits um eine Vorform der in Abschnitt 3.3.3 aufgeführten Cyberphysischen Systeme.

Baustellen als *intelligente* autonome Systeme

Anknüpfend an die Darstellung zu Cyberphysischen Systemen sei an dieser Stelle noch einmal erwähnt, dass im Hinblick auf die dritte Allokationsstufe zukünftig eine Zunahme an autonomen Systemen zu erwarten ist. Als wesentliches Phänomen im Zuge der Weiterentwicklungen entsprechender Baustellen kann in erster Linie die *Künstliche Intelligenz* genannt werden. Durch verschiedene Interaktionen mehrerer miteinander verknüpfter Technologien entstehen auf Grundlage intelligent agierender Umgebungen mehr und mehr smarte und v. a. heterogene Robotersysteme. Die *Baustelle der Zukunft* kann durch die aufeinander abgestimmten Prozesse diesbezüglich auch als *Komplexes Adaptive System* aufgefasst werden. Mehrwerte entsprechender künstlicher bzw. autonomer Systeme, die bspw. durch *Data Mining*, *Computer Vision* oder die *Blockchain* hervorgerufen werden, sind neben der Wirtschaftlichkeit v. a. auch Aspekte der Sicherheit. Mithilfe verschiedener Kombinationen können darüber hinaus zusätzliche Vorteile innerhalb eines auf Datenbanken basierenden und auf Grundlage von Expertensystemen beruhenden Systems genutzt werden. Um entsprechende weiterführende Schritte einleiten bzw. unterstützen zu können, sind nachfolgend neben politischen Maßnahmen auch unternehmerische bzw. wirtschaftliche Aspekte, sowie weiterer Forschungsbedarf aufgezeigt.

Übergeordnete politische Maßnahmen

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens vorgenommene indirekte Technikbewertung zur Digitalisierung auf Baustellen, weist neben den im Kern verorteten wissenschaftlichen Aspekten v. a. auch gesellschaftlich-politische Faktoren auf, die nicht nur branchenübergreifend zu verstehen sind, sondern im Hinblick auf stabile und souveräne Entscheidungen vordergründig relevant werden (vgl. VDI 3780 2000, S. 3). So können v. a. weiterführende Untersuchungen für festgelegte Bereiche dabei helfen, technische Entwicklungen zielgerichteter zu erfassen. Darauf aufbauende Entscheidungen können jedoch nur nach politisch-demokratischen Regeln in gesellschaftlichen Aushandlungsprozessen zustande kommen (vgl. ebd.). So ist es wichtig, dass übergeordnet Maßnahmen ergriffen werden, die entsprechende Phänomene bzw. Modifikationen berücksichtigen. Dies betrifft u. a. auch mögliche Vorbereitungen auf die anstehenden Veränderungen im Hinblick auf die Erwerbstätigkeit der Bevölkerung (vgl. Windhagen et al. 2017, S. 1). Um die damit einhergehenden Herausforderungen meistern zu können, sollten insbesondere Bildungseinrichtungen durch gezielte Investitionen finanziell unterstützt werden, damit junge Menschen durch den Ausbau von Bildungs- und Weiterbildungsprogrammen für den Arbeitsmarkt der Zukunft qualifiziert werden (vgl. ebd., S. 1 und S. 17).

Neben entsprechenden finanziellen Entscheidungen sind darüber hinaus ebenfalls die mit dem Lohnsektor verknüpften Mensch-Maschine-Interaktionen zu berücksichtigen. Insbesondere die in Abschnitt 3.2 thematisierten Substituierbarkeitspotenziale und Automatisierungswahrscheinlichkeiten stellen diesbezüglich aus einer übergeordneten gesellschaftlichen Sicht zentrale Faktoren dar, weil durch die möglichen Ersetzbarkeiten auch Lohnanforderungen erheblich modifiziert werden (vgl. Helmus 2011, S. 129). Auch sind Aspekte der Ethik in Bezug auf weiter zunehmende Roboteranwendungen sowie den damit einhergehenden, meist noch offenen Fragen des Datenschutzes und der Überwachungsstrukturen, bisher nicht ausreichend untersucht (vgl. Helmus 2011, S. 129; Dengler & Matthes 2018, S. 9).

Zusätzlich zu den anstehenden Automatisierungen im Bauwesen, wird es ebenfalls immer wichtiger, Lösungen für den rapide ansteigenden Fachkräftemangel zu finden, der – wie bereits in Abschnitt 1.1 aufgeführt – im Handwerk sehr hoch ist. Neben möglichen Ansätzen zu Anpassungen in der Einwanderungspolitik (vgl. Windhagen et al. 2017, S. 1), sollten jedoch insbesondere auch Konzepte herangezogen werden, welche die junge Bevölkerung dazu bringt, sich – direkt oder indirekt – an den Bewältigungen der anstehenden Herausforderungen zu beteiligen. Die Digitalisierung kann diesbezüglich Abhilfe schaffen, da für viele junge Menschen ein zukünftiges Arbeitsfeld mit innovativen Technologien, wie bspw. Augmented Reality oder Robotern, als überaus interessant erscheint (vgl. Jordan 2017, S. 131; Wieselhuber 2018, S. 45). In Deutschland sind sogar 53 % der Betriebe davon überzeugt, dass der Einsatz von digitalen Medien die Attraktivität einer Berufsausbildung steigert (vgl. Gensicke et al. 2016, S. 42). Implementierungen innovativer Technologien stellen nicht nur übergeordnet einen wichtigen Aspekt angesichts des hohen Fachkräftemangels dar, sie können darüber hinaus ebenfalls zur

Rekrutierung von Auszubildenden herangezogen werden (vgl. ebd.). Letztendlich sind jedoch aus gesellschaftlicher Sicht alle dazu aufgerufen, sich mit der überaus wichtigen übergeordneten Thematik der Digitalisierung auseinanderzusetzen, da ein technisch-ökonomischer Wandel „nur durch eine Kultur der Beteiligung gelingen kann“ (Rauner 2014, S. 45).

Unternehmerische bzw. wirtschaftliche Aspekte

Nicht nur die Politik ist gefordert, wenn es darum geht, die Herausforderungen der Digitalisierung zu meistern, auch die einzelnen Unternehmen – unabhängig von ihrer Größe – stehen in der Verantwortung, die aktuellen und zukünftigen Aufgaben mit zu bewältigen. Diesbezüglich ist es sinnvoll, nicht nur klare betriebsinterne Vorgaben in den einzelnen Baufirmen vorzunehmen, sondern auch in potenzielle Zukunftstechnologien zu investieren. Da v. a. auch auf Baustellen weiterhin fachspezifisch ausgebildetes Personal benötigt wird, sollten insbesondere kleine und mittelständische Unternehmen digitalen Pioniergeist zeigen und langfristig ausgerichtete Orientierungen vornehmen (vgl. Mohr et al. 2017, S. 8). Das Argument, dass mit dem digitalen Wandel ein erheblicher Mehraufwand einhergeht, konnte im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens weitestgehend durch Aufzählen verschiedener Vorteile – die insbesondere die Methode BIM mit sich bringt – entkräftet werden. Da bspw. die erforderlichen Informationen zur Errichtung von Bauwerken ohnehin erstellt werden müssen, ist ein zusätzlicher Aufwand mit einem digital ausgerichteten Ansatz nicht verbunden (vgl. Planen Bauen 4.0 2015b, S. 16). Gerade bei kleineren Betrieben können zudem die flachen und agilen Arbeitsstrukturen unterstützend dabei helfen, verschiedene digitale Prozesse voranzutreiben (vgl. Mohr et al. 2017, S. 8; Windhagen et al. 2017, S. 1). Auch die Angst, dass handwerkliche Tätigkeiten keine Zukunft haben – und dabei stehen i. d. R. kleine und mittelständische Unternehmen im Fokus –, kann durch die Tatsache, dass es auch weiterhin Kundinnen und Kunden geben wird, die bereit sind, einen höheren Preis für bessere Qualität zu zahlen, ebenfalls gemindert werden (vgl. Dengler & Matthes 2018, S. 8). Im Hinblick auf die weiter stattfindenden Substituierbarkeiten sei an dieser Stelle zudem erwähnt, dass trotz zunehmender Ersetzbarkeiten bis 2025 davon auszugehen ist, dass etwa genauso viele Arbeitsplätze entstehen, wie entsprechend wegfallen werden (vgl. Dengler & Matthes 2018, S. 10).

Weitere wissenschaftliche Forschungsansätze

Durch die zunehmende Einbindung von Building Information Modeling in die bauberufliche Arbeitswelt bzw. durch die zur Verwendung der Methode vorgelagerten Ausbildungen, werden die in Abschnitt 3.3.2 thematisierten Mensch-Maschine-Interaktionen einen immer größeren Forschungsbereich im Hinblick auf Ersetzbarkeiten und Verteilungen durch Roboterimplementierungen aufdecken. Auch wenn durch die Nutzung der Methode BIM viele anknüpfende Aspekte und auch Probleme indirekt gelöst werden – z. B. wenn die Nutzung von Augmented Reality auf Baustellen zum Standard wird –, entstehen zukünftig viele neue Bereiche, die bisher wenig bis gar nicht betrachtet wurden,

aber dennoch zu untersuchen sind. Zu diesen Gebieten zählen u. a. nicht nur die vordergründig zu betrachtenden Aspekte der Arbeitssicherheit – ohne die auch stark digitalisierte Baustellen nicht ausgeführt werden können –, sondern ebenfalls damit verbundene ergonomisch ausgerichtete Aspekte, die wiederum mit weiteren Forschungszweigen verknüpft sind (vgl. Apt & Wischmann 2017, S. 116). Genannt sei an dieser Stelle auch das *Proactive Computing*, bei dem versucht wird, Verfahren zu entwickeln, die abhängig vom Kontext die Pläne und Ziele von Benutzern erkennen, um dann diese Ziele vollautomatisch zu unterstützen (vgl. Butz & Krüger 2017, S. 199). Dies ist wiederum im Hinblick auf das häufig genannte *Multitasking* – v. a. auch im Rahmen von Nicht-Routine-Tätigkeiten – und zusammen mit potenziellen Informationsüberflüssen zu untersuchen (vgl. BMAS 2015, S. 64). Aspekte des Konzeptes zur *Work-Life-Balance* spielen diesbezüglich in Zukunft ebenfalls eine immer größere Rolle.

Auch führen weitere Technologien und die damit verbundenen Phänomene, wie bspw. die *Künstliche Intelligenz* verstärkt dazu, dass sich Arbeitsplätze weiterhin stark verändern werden. Diesbezüglich sind zukünftig vermehrt wissenschaftliche Untersuchungen durchzuführen. Damit einher gehen nicht nur Auflösungserscheinungen von Berufen generell (vgl. Becker & Spöttl 2008, S. 210; Brater 2010, S. 820), sondern auch differenzierte Analysen nach vielen neuen interdisziplinären Berufsbildern (vgl. Rauner 2014, S. 67). Um die in wissenschaftlichen Analysen gewonnenen Informationen stets zu einem validen Gesamtbild verfestigen und letztlich darauf aufbauend ein passgenaues Bildungsprogramm anbieten zu können, sind weitere Bedarfsanalysen in Forschungsbereichen mit den Komponenten *Technik*, *Arbeit* und *Bildung* notwendig (vgl. Asche 2016, S. 56). Diesbezüglich sollte das im vorliegenden Forschungsvorhaben bereits thematisierte Arbeitsprozesswissen in den Vordergrund gerückt werden, um v. a. die wesentlichen Aspekte der immer stärker informatisierten Baustellenarbeitsprozesse im Rahmen voranschreitender Mensch-Maschine-Interaktionen vertiefend zu untersuchen.

Literaturverzeichnis

- AIST (2018). Humanoid Robot HRP-5P. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST). URL: https://www.aist.go.jp/aist_e/list/latest_research/2018/20181116/en20181116.html (03.03.2020).
- Alber, C., Batran, B. & Blessing, R. (2014). Lernfeld Bautechnik – Fachstufen Maurer, Beton- und Stahlbetonbauer (4. Aufl.). Handwerk und Technik, Hamburg. ISBN: 978-3-582-03524-0.
- Alber, C., Batran, B. & Frey, V. (2017). Lernfeld Bautechnik – Fachstufen Maurer (8. Aufl.). Handwerk und Technik, Hamburg. ISBN: 978-3-582-03522-6.
- Allen, B. (2016). The Future of BIM Will Not Be BIM, and It's Coming Faster Than You Think. URL: <https://www.autodesk.com/autodesk-university/article/Future-BIM-Will-Not-Be-BIM-and-Its-Coming-Faster-You-Think-2017> (03.03.2020).
- Amos, R. (2018). Aerial Data Capture. URL: <http://www.bimplus.co.uk/explainers/cpd-aerial-data-capture/> (02.03.2020).
- Apel, J. & Apt, W. (2017). Digitales Lernen. In: Digitalisierung: Bildung – Technik – Innovation (Hrsg. V. Wittpahl), S. 67-75. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-662-52853-2.
- Apt, W. & Wischmann, S. (2017). Neue Gestaltungsmöglichkeiten für die Arbeitswelt. In: Digitalisierung: Bildung – Technik – Innovation (Hrsg. V. Wittpahl), S. 109–117. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-662-52853-2.
- Archinet (2019). Internetseite der Plattform Archinect. URL: <https://archinect.com/news/article/150124754/this-mixed-reality-hard-hat-connects-with-microsoft-s-new-hololens-2> (30.08.2019).
- Arnold, D., Butschek, S., Steffes, S. & Müller, D. (2015). Digitalisierung am Arbeitsplatz. URL: <https://www.bmas.de/DE/Service/Medien/Publikationen/Forschungsberichte/Forschungsberichte-Arbeitsmarkt/fb468-digitalisierung-am-arbeitsplatz.html> (03.03.2020).
- Arntz, M., Gregory, T., Lehmer, F., Matthes, B. & Zierahn, U. (2016). Dienstleister haben die Nase vorn: Arbeitswelt 4.0 – Stand der Digitalisierung in Deutschland (Hrsg. IAB). URL: <https://www.iab.de/194/section.aspx/Publikation/k161007301> (03.03.2020).

- Aromaa, S. (2018). Virtual prototyping in evaluation of human factors and ergonomics of human-machine systems. URL: [https://tutcris.tut.fi/portal/en/publications/virtual-prototyping-in-evaluation-of-human-factors-and-ergonomics-of-human-machine-systems\(2de092a6-eea3-4628-b497-46e564c7dbb8\).html](https://tutcris.tut.fi/portal/en/publications/virtual-prototyping-in-evaluation-of-human-factors-and-ergonomics-of-human-machine-systems(2de092a6-eea3-4628-b497-46e564c7dbb8).html) (03.03.2020).
- Arup (2018). Bringing 3D printing to construction. URL: <https://www.arup.com/projects/3d-housing-05> (05.03.2020).
- Asche, E. (2016). Bedarfsanalyse im Kontext der Digitalisierung – Herausforderungen und Lösungsansätze aus Sicht eines Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrums. In: Wissenschaft trifft Praxis – Ausgabe 5 (Hrsg. Begleitforschung Mittelstand-Digital), S. 54–59. URL: <https://www.mittelstand-digital.de/MD/Redaktion/DE/Publikationen/Wissenschaft-trifft-Praxis/magazin-wissenschaft-trifft-praxis-ausgabe5.html> (05.03.2020).
- Atteslander, P. (2010). Methoden der empirischen Sozialforschung (13. Aufl.). Erich Schmidt, Berlin. ISBN: 978-3-503-12618-7.
- Aust, M. (2016). Die „immersive Planungsbesprechung“ – wie BIM von Virtual Reality profitiert. In: Ernst & Sohn Spezial 2016: BIM – Building Information Modeling, S. 51–54. Ernst & Sohn, Berlin. ISSN-Nr. nicht existent.
- Azuma, R. T. (1997). A Survey of Augmented Reality. In: Teleoperators and Virtual Environments, No. 6, S. 355-385. ISSN: 1054-7460.
- Bach, A. (2017). Medienspektrum zur Berufsausbildung im Bauwesen – erste Analysen, Perspektiven und Forschungsdesiderata. In: BAG-Report S. 9–14. URL: <https://bag-bau-holz-farbe.de/schlagwort/bag-report/> (05.03.2020).
- Bahlau, S. & Klemm-Albert, K. (2018). Evaluationen zu den Potenzialen von Building Information Modeling. In: Bauingenieur, Band 93, S. 286–294. ISSN: 0005-6650.
- Baier, C. & Díaz, J. (2017). Eignung für kleinere und mittlere Bauunternehmen. In: BIM-Ratgeber für Bauunternehmer (Hrsg. J. Díaz; K. Silbe), S. 29–36. Rudolf Müller, Köln. ISBN: 978-3-481-03566-2.
- Batran, B., Bläsi, H., Frey, V., Hillberger, G. & Hühn, K. (2014). Lernfeld Bautechnik – Grundstufe (12. Aufl.). Handwerk und Technik, Hamburg. ISBN: 978-3-582-03520-2.
- Bauer, W. (2018). Raus aus den eingefahrenen Gleisen – Trends der Arbeit in der digitalen Transformation. URL: <https://www.iab-forum.de/raus-aus-eingefahrenen-gleisen-trends-der-arbeit-in-der-digitalen-tr> (05.03.2020).
- Bauindustrie (2018). Liste der 50 größten deutschen Bauunternehmen in 2017. URL: <https://www.bauindustrie.de/documents/1746/2018.08.13> (05.03.2020).
- Bauindustrie (2019). BIM im Hochbau. URL: <https://www.bauindustrie.de/presse/presseinformationen/positionspapier-bim-im-hochbau/> (05.03.2020).

- Baum, G. (2015). Auf dem Weg zum Weltüberwachungsmarkt. In: Technologischer Totalitarismus (Hrsg. F. Schirmmacher), S. 54–61. Suhrkamp, Berlin. ISBN: 978-3-518-07434-3.
- Baumanns, T., Freber, P.-S., Schober, K.-S. & Kirchner, F. (2016). Bauwirtschaft im Wandel (Hrsg. Hypo Vereinsbank und Roland Berger). URL: https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/roland_berger_hvb_studie_bauwirtschaft_20160415_1_.pdf (07.03.2020).
- BAW (2019). Marktanalyse Ingenieurbau (Hrsg. BAW). ISBN: 978-3-939230-60-1. URL: <https://henry.baw.de/handle/20.500.11970/106286> (07.03.2020).
- BBiG (2005). Berufsbildungsgesetz (Das Dokument stammt aus dem Jahr 2005, die letzte Änderung wurde mit dem 17.7.2017 datiert.). URL: https://www.gesetze-im-internet.de/bbig_2005/BBiG.pdf (05.03.2020).
- BDEW (2017). Ausbau der öffentlich zugänglichen Ladepunkte (Hrsg. BDEW). URL: https://www.bdew.de/media/documents/PI_20171024_Anlage_Grafiken-Erhebung-Ladeinfrastruktur.pdf (12.19.2020).
- Beck, M. & Nagel, L. (2016). Eine Frage der Kultur – Wie die Industrie 4.0-Qualifizierung im Mittelstand gelingen kann. In: Wissenschaft trifft Praxis – Ausgabe 5 (Hrsg. Begleitforschung Mittelstand-Digital), S. 12–17. URL: <https://www.mittelstand-digital.de/MD/Redaktion/DE/Publikationen/Wissenschaft-trifft-Praxis/magazin-wissenschaft-trifft-praxis-ausgabe5.html> (05.03.2020).
- Becker, M. & Spöttl, G. (2008). Berufswissenschaftliche Forschung. P. Lang, Frankfurt. ISBN: 978-3-631-58029-5.
- Becker, M. & Spöttl, G. (2019). Auswirkungen der Digitalisierung auf die berufliche Bildung am Beispiel der Metall- und Elektroindustrie. In: Zeitschrift für Erziehungswissenschaft, S. 78–104. ISSN: 1434-663X. DOI: 10.1007/s11618-019-00869-1.
- Becker, P. (2017). Fallstudie: Vision Lasertechnik GmbH. In: Digitalisierung und Industrie 4.0 – Herausforderungen für den Mittelstand (Hrsg.: A. Dreier, R. Merk, B. Seel), S. 141-149. FHM, Bielefeld. URL: https://www.fh-mittelstand.de/fileadmin/pdf/Schriftenreihe/Heft_8.pdf (07.03.2020).
- Beetz, J. (2015). Ordnungssysteme im Bauwesen: Terminologien, Klassifikationen, Taxonomien und Ontologien. In: Building Information Modeling - Technologische Grundlagen und industrielle Praxis (Hrsg. A. Borrmann, M. König, C. Koch, J. Beetz), S. 163–175. Springer Vieweg, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-05605-6.
- Behaneck, M. (2017a). BIM im Betonfertigteilbau: Erst digital, dann real fertigen und montieren. In: BFT International, Nr. 11, S. 52-62. Bauverlag, Gütersloh. ISSN nicht existent. URL: <https://www.bauverlag.de/> (07.03.2020).

- Behaneck, M. (2017*b*). Vom Messpunkt zur Punktwolke. In: Bauhandwerk, Nr. 12, S. 10-14. Bauverlag, Gütersloh. ISSN nicht existent. URL: [https://www.bauverlag.de/\(07.03.2020\)](https://www.bauverlag.de/(07.03.2020)).
- Behaneck, M. (2018*a*). Laser-Distanzmesser. In: Bauhandwerk, S. 12-17. Nr. 3, Bauverlag, Gütersloh. ISSN nicht existent. URL: [https://www.bauverlag.de/\(07.03.2020\)](https://www.bauverlag.de/(07.03.2020)).
- Behaneck, M. (2018*b*). Wo das menschliche Auge nicht hinreicht – Mit Drohnen aufmessen, inspizieren, dokumentieren. In: Bautenschutz + Bausanierung, Nr. 5, S. 46–49. Bauverlag, Gütersloh. ISSN nicht existent. URL: [https://www.bauverlag.de/\(07.03.2020\)](https://www.bauverlag.de/(07.03.2020)).
- Behrendt, E. (2016). Mit digitalen Medien qualifizieren: Hohes Potential wird in Deutschland kaum genutzt. In: Wissenschaft trifft Praxis – Ausgabe 5 (Hrsg. Begleitforschung Mittelstand-Digital), S. 42–47. URL: <https://www.mittelstand-digital.de/MD/Redaktion/DE/Publikationen/Wissenschaft-trifft-Praxis/magazin-wissenschaft-trifft-praxis-ausgabe5.html> (05.03.2020).
- Bellmann, L. (2017*a*). Chancen und Risiken der Digitalisierung für ältere Produktionsarbeiter. In: IAB-Forschungsbericht 15/2017 (Hrsg. IAB Nürnberg). ISSN: 2195-2655. URL: doku.iab.de/forschungsbericht/2017/fb1517.pdf (07.03.2020).
- Bellmann, L. (2017*b*). Die Digitalisierung birgt viele Herausforderungen – auch im Hinblick auf das Engagement von Beschäftigten. In: IAB-Forum. URL: <https://www.iab-forum.de/die-digitalisierung-birgt-viele-herausforderungen-auch-im-hinblick-auf-das-engagement-von-beschaeftigten/> (07.03.2020).
- Benner, C. (2015). Wer schützt die Clickworker? In: Technologischer Totalitarismus (Hrsg. F. Schirmacher), S. 90-95. Suhrkamp, Berlin. ISBN: 978-3-518-07434-3.
- Berbig, T., Dittrich, J., Menzel, K., Eisenblätter, K. & Domschke, S. (2003). Mobile Computing – Anforderungen und Einführungsstrategie aus Sicht der Bau-praxis. In: Tagungsband zum Internationalen Kolloquium für Mathematik und Informatik im Bauwesen. Bauhaus Universität, Weimar. URL: <https://e-pub.uni-weimar.de/opus4/frontdoor/index/index/docId/294> (08.03.2020).
- Berger, R. (2016). Think Act: Digitalisierung der Bauwirtschaft – Der europäische Weg zu Construction 4.0. URL: <https://www.rolandberger.com/de/Media/Digitalisierung-der-Baubranche.html> (05.03.2020).
- Berger, R. (2017). Turning point for the construction industry – The disruptive impact of BIM. URL: https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/roland_berger_building_information_modeling_2017.pdf (05.03.2020).
- Bernaerts, Y., Druwé, M., Steensels, S., Vermeulen, J. & Schöning, J. (2014). The office smartwatch. In: DIS, S. 41-44. URL: <https://doi.org/10.1145/2598784.2602777> (05.03.2020).

- Berner, F., Maier, S., von Heyl, J., Spieth, P., Binder, F. & Kuhn, A. (2018). Prototypische Entwicklung eines BIM-Instruments für die Bestellung, Lieferung und Dokumentation von Transportbeton. In: Bauingenieur, Band 93, S. 260–264. ISSN: 0005-6650.
- Bernert, D. (2016). BIM-Experten gesucht. In: Ernst & Sohn Special 2016 – Building Information Modeling, S. 33–35. Ernst & Sohn, Berlin. ISSN nicht existent. URL: <https://www.ernst-und-sohn.de/sonderhefte/bim-building-information-modeling-2016> (07.03.2020).
- Bernert, D. (2017). Mixed Reality für die Bauindustrie – Welche Verbesserungen bringen neue Arbeitsweisen? In: Computer Spezial, Nr. 2, S. 30-31. Bauverlag, Gütersloh. ISSN nicht existent. URL: <https://www.bauverlag.de/> (07.03.2020).
- Bernert, D. (2018). BIM in der Ausbildung – Für mehr Erfolg im Unternehmen. In: Computer Spezial, Nr. 1, S. 26-27. Bauverlag, Gütersloh. ISSN nicht existent. URL: <https://www.bauverlag.de/> (07.03.2020).
- Bernstein, P. (2017). Ein Blick in die Zukunft der Branche – Big Data und VR revolutionieren die Architektur. In: Computer Spezial, Nr. 2, S. 22-23. Bauverlag, Gütersloh. ISSN nicht existent. URL: <https://www.bauverlag.de/> (07.03.2020).
- Berufenet (2018). Angaben zu Ausbildungsberufen der Bundesagentur für Arbeit. URL: www.berufenet.arbeitsagentur.de (Die Angaben zu den Berufen von Maurer/-innen, sowie Beton- u. Stahlbetonbauer/-innen können durch Eingabe der Begriffe online auf der angegebenen Website eingesehen werden; die Angaben finden sich zudem im Anhang.) (05.03.2020).
- BGBl (1999). Verordnung über die Berufsausbildung in der Bauwirtschaft (Bundesgesetzblatt, 1999, inkl. Ausbildungsrahmenplänen im Anhang). URL: https://www.bibb.de/tools/berufesuche/index.php/regulation/bauwirtschaft_1999.pdf (05.03.2020).
- BGM (2019). Bauma 2019: PERI mit digitalem Portfolio. In: Baugewerbemagazin. URL: <https://www.baugewerbe-magazin.de/betonbau/auf-der-bauma-zeigt-peri-schalungs-und-geruestsysteme-sowie-apps-fuer-den-alltag.htm> (05.03.2020).
- Böhle, F. (2010). Arbeiten als Handeln. In: Handbuch Arbeitssoziologie (1. Aufl., Hrsg. F. Böhle, G. Voß, G. Wachtler), S. 151–176. VS Verlag, Wiesbaden. ISBN: 978-3-531-15432-9.
- BIBB (2017). Datenreport zum Berufsbildungsbericht 2017 (Hrsg. BMBF). Bertelsmann, Bielefeld. URL: https://www.bibb.de/dokumente/pdf/bibb_datenreport_2017.pdf (07.03.2020).
- BIC (2017). Fehlerkostenreduzierung: Deutsche Architekten hoffen auf BIM (Hrsg. Bauinfoconsult). URL: www.bauinfoconsult.de/presse/pressemitteilungen/2017/fehlerkostenreduzierung_deutsche_architekten_hoffen_auf_bim/2677 (05.03.2020).

- BIMplus (2017a). Technology: Rebar robot ties steel for fast construction (Hrsg. BIM+). URL: www.bimplus.co.uk/technology/rebar-robot-ties-steel-fast-construction/ (05.03.2020).
- BIMplus (2017b). Komatsu takes first step to the autonomous construction site (Hrsg. BIM+). URL: www.bimplus.co.uk/news/komatsu-takes-first-step-autonomous-construction-s/ (05.03.2020).
- BIMplus (2018a). Technology: US developed Cheetah robot can climb stairs (Hrsg. BIM+). URL: www.bimplus.co.uk/technology/us-developed-cheetah-robot-can-climb-stairs/ (05.03.2020).
- BIMplus (2018b). Doxel: AI-enabled robot carries out site inspections (Hrsg. BIM+). URL: <http://www.bimplus.co.uk/news/ai-enabled-robot-carries-out-site-inspections/> (05.03.2020).
- Blanke, K., Gauckler, B. & Sattelberger, S. (2008). Fragebogen auf dem Prüfstand: Testmethoden und deren Einsatz in der amtlichen Statistik (Hrsg. Destatis). URL: <https://www.destatis.de/DE/Methoden/WISTA-Wirtschaft-und-Statistik/2008/08/fragebogen-testmethoden-082008.html> (07.03.2020).
- Blankenbach, J. (2015). Bauwerksvermessung für BIM. In: Building Information Modeling (Hrsg. A. Borrmann, M. König, C. Koch, J. Beetz), S. 343–362. Springer Vieweg, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-05605-6.
- Blödorn, H. (2017). Abrechnungsinformationen digital austauschen – Mengenermittlung im Verkehrswegebau. In: Computer Spezial Nr. 2, S. 32-33. Bauverlag, Gütersloh. ISSN nicht existent. URL: <https://www.bauverlag.de/> (07.03.2020).
- Blödorn, H. (2018). Bauhandwerk 4.0 – Unterstützung für die gläserne Baustelle. In: Computer Spezial, Nr. 1, S. 30-31. Bauverlag, Gütersloh. ISSN nicht existent. URL: <https://www.bauverlag.de/> (07.03.2020).
- Büllingen, F. & Stamm, P. (2016). Wissenschaft trifft Praxis – Ausgabe 5 (Hrsg. Begleitforschung Mittelstand-Digital). ISBN: 2198-8544. URL: <https://www.mittelstand-digital.de/MD/Redaktion/DE/Publikationen/Wissenschaft-trifft-Praxis/magazin-wissenschaft-trifft-praxis-ausgabe5.html> (12.03.2020).
- Blockley, D. I. (2005). The New Penguin Dictionary of Civil Engineering. Penguin, London. ISBN: 978-0-140-51526-8.
- Bluesky (2018). Aerial Survey Overview. Internetseite des Unternehmens Bluesky. URL: <https://www.bluesky-world.com/aerial-survey-overview> (05.03.2020).
- BM (2016). Netzwerk Baustelle. In: BM Bau- und Möbelschreiner, Heft 10, S. 109-112. ISSN: 0341-3659.

- BMAS (2015). Arbeit weiter denken – Grünbuch: Arbeiten 4.0 (Hrsg. BMAS). URL: <https://www.bmas.de/DE/Service/Medien/Publikationen/A872-gruenbuch-arbeiten-vier-null.html> (07.03.2020).
- BMBF (2013). Zukunftsbild „Industrie 4.0“. URL: <https://www.plattform-i40.de/PI40/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/zukunftsbild-industrie-4-0.html> (07.03.2020).
- BMBF (2017). Richtlinie zur Förderung von Forschung zu „Digitalisierung im Bildungsbereich – Grundsatzfragen und Gelingensbedingungen“ (Hrsg. BMBF). URL: www.bmbf.de/foerderungen/bekanntmachung-1420.html (12.03.2020).
- BMVBS (2013). BIM-Leitfaden für Deutschland – Information und Ratgeber – Endbericht (Hrsg. M. Egger, K. Hausknecht, T. Liebich, J. Przybylo). URL: https://www.akbw.de/fileadmin/download/Freie_Dokumente/Kammer/BIM_Leitfaden_f%C3%BCr_Deutschland_Endbericht.pdf (07.03.2020).
- BMVI (2015). Stufenplan Digitales Planen und Bauen (Hrsg. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, planen-bauen 4.0, H. Bramann, I. May). URL: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/stufenplan-digitales-bauen.pdf?__blob=publicationFile (12.03.2020).
- BMVI (2017). Umsetzung des Stufenplans Digitales Planen und Bauen (Hrsg. BMVI). URL: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/bim-umsetzung-stufenplan-erster-fortschrittsbe.pdf?__blob=publicationFile (12.03.2020).
- BMVI (2019). Bundesregierung treibt Digitalisierung des Bauwesens voran (Hrsg. BMVI). URL: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2019/051-scheuer-bim-kompetenzzentrum.html> (12.03.2020).
- BMW i (2017). Sensor, Tablet, RFID: Digitale Technologien in der Produktion (Hrsg. BMW i). URL: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Digitale-Welt/digitale-technologien-in-der-produktion.html> (12.03.2020).
- Bock, T. & Linner, T. (2015). Robot-oriented design. Cambridge University Press, New York. ISBN: 978-1-107-07638-9.
- Boden, M. (2018). Artificial Intelligence – A very short introduction. University Press, Oxford. ISBN: 978-0-19-960291-9.
- Boes, A., Kämpf, T., Langes, B. & Lühr, T. (2014). Informatisierung und neue Entwicklungstendenzen von Arbeit. In: Arbeits- und industriesoziologische Studien, Heft 1, S. 5-23. ISSN: 1866-9549. URL: <https://www.arbsoz.de/ais-studien-leser/148-informatisierung-und-neue-entwicklungstendenzen-von> (12.03.2020).
- Bogner, A., Littig, B. & Menz, W. (2014). Interviews mit Experten. Springer, Wiesbaden ISBN: 978-3-531-19415-8. DOI: 10.1007/978-3-531-19416-5.

- Bonin, H., Gregory, T. & Zierahn, U. (2015). Übertragung der Studie von Frey/Osborne (2013) auf Deutschland. URL: <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/123310/1/82873271X.pdf> (15.03.2020).
- Borrmann, A. & Günthner, W. (2011). Die digitale Baustelle und ihre Herausforderungen. In: *Digitale Baustelle – innovativer Planen, effizienter Ausführen* (Hrsg. W. Günthner, A. Borrmann), S. 2-7. Springer, Heidelberg. ISBN: 978-3-642-16485-9.
- Borrmann, A., König, M., Koch, C. & Beetz, J. (2015). *Building Information Modeling*. Springer Vieweg, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-05605-6.
- Boston Dynamics (2019). Internetseite des amerikanischen Unternehmens Boston Dynamics. URL: <https://www.bostondynamics.com> (15.03.2020).
- Both, P. v. & Wallner, S. (2017). *BIM Tools Overview - Zielgruppen- und prozessorientierte Untersuchung freier BIM Werkzeuge*. IRB-Verlag, Stuttgart. ISBN: 978-3-738-80039-5.
- Brancato, G., Macchia, S., Murgia, M., Signore, M. & Simeoni, G. (2006). *Handbook of Recommended Practices for Questionnaire Development and Testing in the European Statistical System*. URL: <https://unstats.un.org/unsd/EconStatKB/KnowledgebaseArticle10364.aspx> (12.03.2020).
- Brandt, M. (2016). *Building Information Modeling – Ein Milliarden-Markt*. URL: <https://de.statista.com/infografik/5396/marktzahlen-zum-building-information-modeling/> (12.03.2020).
- Brater, M. (2010). Berufliche Bildung. In: *Handbuch Arbeitssoziologie* (1. Aufl., Hrsg. F. Böhle, G. Voß, G. Wachtler), S. 805–837. VS-Verlag, Wiesbaden. ISBN: 978-3-531-15432-9.
- Braun, S., Rieck, A. & Köhler-Hammer, C. (2015). *Ergebnisse der BIM-Studie für Planer und Ausführende – Digitale Planungs- und Fertigungsmethoden* (Hrsg. Fraunhofer IAO). URL: https://www.detail.de/fileadmin/uploads/BIM-Studie_CKH__150706.pdf (12.03.2020).
- Brehm, E. (2019). Robotertechnik für den Mauerwerksbau – Internationaler Status und Überlegungen für den deutschen Markt. In: *Mauerwerk*, Band 23, S. 87-94. Ernst & Sohn, Berlin. ISSN: 1432-3427. DOI: 10.1002/dama.201900004.
- Brell-Cokcan, S. & Braumann, J. (2013). *RobArch 2012 – Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design*. Springer, Wien, New York. ISBN: 978-3-7091-1464-3.
- Bremer, R. (2006). Zur Implementation grundlegender Methoden in der Berufsbildungsforschung. In: *Handbuch Berufsbildungsforschung* (Hrsg. F. Rauner), S. 588–594. Bertelsmann, Bielefeld. ISBN: 3-7639-3463-4.

- Bürger, R. (2018). Wir müssen die Verschwendung in der Wertschöpfungskette reduzieren. Digitalisierung als Effizienz-Tool. In: THIS, Nr. 2, S. 58-60. ISSN nicht existent. URL: <https://www.bauverlag.de/> (12.03.2020).
- Brokbals, S. & Čadež, I. (2017). BIM in der Hochschullehre. In: Bautechnik, Band 94, S. 851-856. Ernst & Sohn, Berlin. ISSN: 0932-8351 DOI: 10.1002/bate.201700100.
- Brzeski, C. & Burk, I. (2015). Die Roboter kommen. In: Economic Research (Hrsg. IngDiba). URL: <https://www.ing-diba.de/binaries/content/assets/pdf/ueberuns/presse/publikationen/ing-diba-economic-analysis-die-roboter-kommen.pdf> (12.03.2020).
- BS (2019). Internetseite des Verbandes buildingSMART Deutschland e. V. URL: <https://www.buildingsmart.de/> (12.03.2020).
- BTB (2018). Richtig betonieren – So gehts! (Hrsg. Bundesverband Transportbeton). URL: <https://www.transportbeton.org/baustoff/richtig-betonieren/> (12.03.2020).
- Buchli, J., Giftthaler, M., Kumar, N., Lussi, M. & Sandy, T. (2018). Digital in situ fabrication - Challenges and opportunities for robotic in situ fabrication in architecture, construction, and beyond. In: Cement and Concrete Research, Nr. 112, S. 66-75. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.05.013.
- Buddenbohm, C. (2019). Verfügbarkeit von Fachkräften (Hrsg. ZDB, Berlin). In: beton, Nr. 9, S. 324, Bau + Technik, Erkrath. ISSN nicht existent. URL: <https://www.verlagbt.de/verlag/beton/mediadaten/index.php?navid=20> (12.03.2020).
- Bullinger, H.-J. & Schmidt, S. L. (2002). Früherkennung von Qualifikationserfordernissen zur Vermeidung von Fachkräftemangel. In: Qualifizierungsoffensive – Bedarf frühzeitig erkennen – zukunftsorientiert handeln (Hrsg. H.-J Bullinger). S. 35-58. Bertelsmann, Bielefeld. ISBN: 3-7639-3029-9.
- Bundesagentur für Arbeit (2015). Berufssektoren und Berufssegmente auf Grundlage der Klassifikation der Berufe 2010. URL: <https://statistik.arbeitsagentur.de/Navigation/Statistik/Grundlagen/Klassifikationen/Klassifikation-der-Berufe/KldB2010/Systematik-Verzeichnisse/Systematik-Verzeichnisse-Nav.html> (12.03.2020).
- Butz, A. & Krüger, A. (2017). Mensch-Maschine-Interaktion (2. Aufl.). Walter de Gruyter, Berlin. ISBN: 978-3-11047-636-1.
- Butz, E., Rattinger, H. & Bergmann, M. (2009). Kleine Unterschiede, große Wirkung? – Eine Analyse zur Wirkung von Frageformulierung, -positionierung und -reihenfolge. In: Vom Interview zur Analyse – Methodische Aspekte der Einstellungs- und Wahlforschung (Hrsg. H. Schoen, H. Rattinger, O. W. Gabriel). S. 156–179. Nomos, Baden-Baden. ISBN: 978-3-84521-907-3.

- Cambridge (2018). Cambridge Dictionary – Online-Wörterbuch der Cambridge University Press. URL: <https://dictionary.cambridge.org/> (12.03.2020).
- Canvas (2018). Internetseite des Unternehmens Canvas Occipital. URL: www.canvas.io (12.03.2020).
- Carbonero, F., Ernst, E. & Weber, E. (2018). Robots worldwide: The impact of automation on employment and trade. URL: www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/—dgreports/—inst/documents/publication/wcms_648063.pdf (12.03.2020).
- Carmichael, T. & Hadzikadic, M. (2019). Complex Adaptive Systems. Springer, Cham (Schweiz). ISBN: 978-3-030-20309-2.
- Caterpillar (2018). Catphones des Unternehmens Caterpillar. URL: www.catphones.com (12.03.2020).
- Caviezel, C., Grünwald, R., Ehrenberg-Silies, S., Kind, S. & Jetzke, T. (2017). Additive Fertigungsverfahren (3D-Druck) – Innovationsanalyse. URL: <http://www.tab-beim-bundestag.de/de/untersuchungen/u20300.html> (12.03.2020).
- Chevin, D. (2017). Cable-stay robot can build, learn and it could replace cranes (Hrsg. BIM+). URL: www.bimplus.co.uk/technology/cable-stay-robot-can-build-learn-and-it-could-repl/ (12.03.2020).
- Chevin, D. (2018a). Survey: BIM-Level 2 uptake still slow, but Augmented Reality and Automation up (Hrsg. Construction Manager Magazine). URL: <http://www.constructionmanagermagazine.com/insight/bim-level-2-uptake-still-slow-ar-and-automation/> (12.03.2020).
- Chevin, D. (2018b). New software allows project teams to meet and interact using holograms (Hrsg. BIM+). URL: <http://www.bimplus.co.uk/news/new-software-allows-project-teams-meet-and-interac/> (12.03.2020).
- Chevin, D. (2018c). Taking 3D printing a step closer to the mainstream (Hrsg. BIM+). URL: <http://www.bimplus.co.uk/people/interview-taking-3d-printing-step-closer-mainstrea/> (12.03.2020).
- Chevin, D. (2018d). There’s no future planning at Autodesk that doesn’t involve AI and ML (Hrsg. BIM+). URL: <http://www.bimplus.co.uk/people/ai-special-theres-no-future-planning-autodesk-does/> (12.02.2020).
- Chevin, D. (2018e). AI special: all you need to know about its impact – now and in the future (Hrsg. BIM+). URL: <http://www.bimplus.co.uk/technology/ai-special-all-you-need-know-about-its-impact-cons/> (12.03.2020).
- Chomsky, N. (1968). Sprache und Geist (12. Aufl.). Suhrkamp, Frankfurt. ISBN: 978-3-518-27619-8.

- Christalon, H. & Neubauer, C. (2015). BIM powered by PORR AG. In: Building Information Modeling (Hrsg. A. Borrmann, M. König, C. Koch, J. Beetz), S. 499-510. Springer, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-05605-6.
- City Hire (2018). Internetseite des Unternehmens City Hire. URL: www.cityhire.co.uk (12.03.2020).
- Claypool, M., Garcia, M. J., Retsin, G. & Soler, V. (2019). Craft. In: Robotic Building (Hrsg. M. Claypool, M. J. Garcia, G. Retsin, V. Soler), S. 22-35. Detail, München. ISBN: 978-3-95553-425-7.
- Cohen, L., Buvat, J., Khadikar, A., Duboé, P., Meltont, D. & Shah, H. (2018). Augmented and Virtual Reality in operations (Hrsg. Capgemini Research Institute). URL: www.capgemini.com/research/augmented-and-virtual-reality-in-operations/ (12.03.2020).
- Constructible (2019). Mixed Reality In Construction Gets Real with Trimble's HoloLens Hard Hat. URL: <https://constructible.trimble.com/construction-industry/mixed-reality-in-construction-gets-real-with-trimble-hololens-hard-hat-video> (12.03.2020).
- Construction Robotics (2019). SAM 100 – Internetseite des Unternehmens Construction Robotics. URL: <https://www.construction-robotics.com/sam100/> (12.03.2020).
- Cousins, S. (2018a). Tennessee prepares for world's first freeform 3D printed house. URL: <http://www.bimplus.co.uk/news/tennessee-prepares-worlds-first-freeform-3d-printe/> (12.03.2020).
- Cousins, S. (2018b). Hard hat innovation brings augmented reality to site. URL: <http://www.bimplus.co.uk/technology/hard-hat-innovation-brings-augmented-reality-site/> (12.03.2020).
- Cousins, S. (2018c). Technology: Groundworks enters the digital age. URL: <http://www.bimplus.co.uk/technology/groundworks-sector-vgoes-digital/> (12.03.2020).
- Cousins, S. (2018d). Robot Chair Builder Tech Set to be used in 3D Printing. URL: <http://www.bimplus.co.uk/technology/robot-chair-builder-tech-set-be-used-3d-printing/> (12.03.2020).
- Craftnote (2019). Internetseite des Unternehmens MyCraftNote (Handwerker-App). URL: <https://www.mycraftnote.de> (12.03.2020).
- Daheim, C. & Wintermann, O. (2016). 2050: Die Zukunft der Arbeit. URL: https://www.bertelsmann-stiftung.de/fileadmin/files/BSt/Publikationen/GrauePublikationen/BST_Delphi_%20Studie_2016.pdf (12.03.2020).
- Dalux (2018). Software Applikation Dalux Field auf der Internetseite des Unternehmens Dalux. URL: <https://www.dalux.com/de/dalux-field/> (12.03.2020).

- Díaz, J., Herter, L. & Silbe, K. (2017). Qualifizierung und Zertifizierung. In: BIM-Ratgeber für Bauunternehmer (Hrsg. K. Silbe, J. Díaz), S. 131-141. Rudolf Müller, Köln. ISBN: 987-3-481-03566-2.
- de Groot, H. (2016). BIM in Australien und Deutschland. In: Ernst & Sohn Spezial 2016: BIM – Building Information Modeling, S. 47-50. Ernst & Sohn, Berlin. ISSN nicht existent. URL: <https://www.ernst-und-sohn.de/sonderhefte/bim-building-information-modeling-2016>. (12.03.2020).
- Dengler, K. & Matthes, B. (2015a). Folgen der Digitalisierung für die Arbeitswelt (Hrsg. IAB). URL: <https://www.iab.de/185/section.aspx/Publikation/k151209302> (12.03.2020).
- Dengler, K. & Matthes, B. (2015b). In kaum einem Beruf ist der Mensch vollständig ersetzbar (Hrsg. IAB). URL: doku.iab.de/kurzber/2015/kb2415.pdf (12.03.2020).
- Dengler, K. & Matthes, B. (2018). Wenige Berufsbilder halten mit der Digitalisierung Schritt – Substituierbarkeit von Berufen (Hrsg. IAB). URL: <https://www.iab.de/194/section.aspx/Publikation/k180213301> (12.03.2020).
- Dengler, K., Matthes, B. & Paulus, W. (2014). Berufliche Tasks auf dem deutschen Arbeitsmarkt. URL: doku.iab.de/fdz/reporte/2014/MR_12-14.pdf (12.03.2020).
- Dengler, K., Matthes, B. & Wydra-Somaggio, G. (2018). Regionale Branchen- und Berufsstrukturen prägen die Substituierbarkeitspotenziale (Hrsg. IAB). URL: <https://www.iab.de/194/section.aspx/Publikation/k180925j03> (12.03.2020).
- Destatis (2017). Statistisches Bundesamt: Produzierendes Gewerbe – Berichtsjahr 2015, Fachserie 4, Reihe 7.2: Handwerk (Hrsg. Bibliothek des Statistischen Bundesamtes). URL: https://www.destatis.de/DE/Service/Bibliothek/_publikationen-fachserienliste-4.html. (12.03.2020).
- Destatis (2018). Statistisches Bundesamt: Ausgewählte Zahlen für die Bauwirtschaft – Oktober 2017 URL: https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Bauen/Publikationen/Downloads-Querschnitt/bauwirtschaft-1020210191104.pdf?__blob=publicationFile (12.03.2020).
- Destatis (2019). Statistisches Bundesamt: Produzierendes Gewerbe – Berichtsjahr 2017, Fachserie 4, Reihe 7.2: Handwerk (Hrsg. Bibliothek des Statistischen Bundesamtes). URL: https://www.destatis.de/DE/Service/Bibliothek/_publikationen-fachserienliste-4.html (16.08.2020).
- DGUV (2017). Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung: Statistik Arbeitsunfallgeschehen 2016. URL: publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/12643-au-statistik-2016.pdf (12.03.2020).
- Dick, M. & Wehner, T. (2006). Wissensmanagement. In: Handbuch Berufsbildungsforschung (Hrsg. F. Rauner), S. 454–462. Bertelsmann, Bielefeld. ISBN: 3-7639-3463-4.

- Diewald, G. & Steinhauer, A. (2019). Gendern – ganz einfach! Dudenverlag, Berlin. ISBN: 978-3-411-74335-3.
- DIN EN ISO 16739 (2017). Industry Foundation Classes (IFC) für den Datenaustausch in der Bauindustrie und im Anlagenmanagement (April 2017). Deutsches Institut für Normung e. V. Beuth Verlag, Berlin.
- Doka (2014). Concremote: Den Bauprozesses optimieren durch Echtzeitüberwachung der Betonfestigkeit. URL: <https://www.doka.com/de/news/press/Concremote> (12.03.2020).
- Doka (2019). Beton unter Beobachtung – Einsatz von Concremote im Brückenbau. In: THIS, Nr. 3, S. 52–54. ISSN nicht existent. URL: <https://www.bauverlag.de/> (12.03.2020).
- Doka (2020). Doka Augmented Reality – Internetseite des Unternehmens Doka URL: <https://www.doka.com/de/home/apps/augmented-reality-app> (12.03.2020).
- Dostal, W. (2013). Methoden der Arbeitsforschung. In: Handbuch Berufsforschung (Hrsg. J.-P. Pahl, V. Herkner), S. 168-176. Bertelsmann, Bielefeld. ISBN: 978-3-7639-5094-2.
- Dowd, S. (2018). Technology: How BIM can shape formwork – RMD Kwikform (Hrsg. BIM+). URL: <http://www.bimplus.co.uk/technology/how-bim-can-shape-formwork/> (12.03.2020).
- Doxel (2019). Artificial Intelligence for Construction Productivity – Internetseite des Unternehmens Doxel. URL: <https://www.doxel.ai/> (12.03.2020).
- Dreher, R. (2016). Industrie 4.0 – Ein Anwendungsfall für die Verantwortung bei gestaltungsorientierter Ingenieurarbeit. In: Die Vielfalt der Wege zu technischer Bildung. UniPrint, Siegen. (Hrsg. G. Kammasch, H. Klaffke, S. Knutzen), S. 71-76. ISBN: 978-3-981-87280-4.
- Dörfler, K., Sandy, T., Giftthaler, M., Gramazio, F. & Kohler, M. (2016). Mobile Robotic Brickwork – Automation of a Discrete Robotic Fabrication Process Using an Autonomous Mobile Robot. In: Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016 (Hrsg. D. Reinhardt, R. Saunders, J. Burry), S. 205-217. Springer, Heidelberg, New York, London. ISBN 978-3-319-26376-2.
- Drossel, W.-G., Ihlenfeldt, S., Langer, T. & Dumitrescu, R. (2018). Cyber-Physische Systeme – Forschen für die digitale Fabrik. In: Digitalisierung – Schlüsseltechnologien für Wirtschaft und Gesellschaft (Hrsg. R. Neugebauer), S. 197-222. Springer, Wiesbaden. ISBN: 978-3-662-55889-8.
- Dunkel, W. & Wiehrich, M. (2010). Arbeiten als Interaktion. In: Handbuch Arbeitssoziologie (Hrsg. F. Böhle, G. Voß, G. Wachtler), S. 177-202. VS-Verlag, Wiesbaden. ISBN: 978-3-531-15432-9.

- Easyflow (2019). Internetseite des Unternehmens Easyflow. URL: <https://easyflow.biz/> (12.03.2020).
- Ebnetter, M., Glockner, O. & Gasnakis, S. (2015). BIM bei Hilti. In: Building Information Modeling (Hrsg. A. Borrmann, M. König, C. Koch, J. Beetz), S. 511-517. Springer Vieweg, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-05605-6.
- ECITB (2019). Industry 4.0: The impact of technological change on the Engineering Construction Industry (Hrsg: ECITB). URL: <https://www.ecitb.org.uk/portfolio-items/technological-change-report/> (12.03.2020).
- Egger, M., Hausknecht, K., Liebich, T. & Przybylo, J. (2013). BIM-Leitfaden für Deutschland – Information und Ratgeber – Endbericht (Hrsg. BMVBS). URL: https://www.akbw.de/fileadmin/download/Freie_Dokumente/Kammer/BIM_Leitfaden_f%C3%BCr_Deutschland_Endbericht.pdf (12.03.2020).
- Ehm, M. & Hesse, C. (2014). 3D-Laserscanning zur Erfassung von Gebäuden – Building Information Modeling. In: Bautechnik, Band 91, S. 243-250. Ernst & Sohn, Berlin. ISSN: 0932-8351.
- Ehrenberg-Silies, S., Kind, S., Apt, W. & Bovenschulte, M. (2017). Wandel von Berufsbildern und Qualifizierungsbedarfen unter dem Einfluss der Digitalisierung. URL: <https://www.tab-beim-bundestag.de/de/pdf/publikationen/berichte/TAB-Horizon-Scanning-hs002.pdf> (16.03.2020).
- Ekso (2018). Roboter-Weste EksoWorks – Internetpräsenz des Unternehmens Eksobionics. URL: www.eksobionics.com/eksoworks/ (12.03.2020).
- Elashry, K. & Glynn, R. (2014). An Approach to Automated Construction Using Adaptive Programming. In: Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2014 (Hrsg. W. McGee, M. Ponce de Leon), S. 51-66. Springer, Schweiz. ISBN: 978-3-319-04662-4.
- Engels, G., Maier, G. W., Ötting, S. K., Steffen, E. & Teetz, A. (2018). Gerechtigkeit in flexiblen Arbeits- und Managementprozessen. In: Zukunft der Arbeit – Eine praxisnahe Betrachtung (Hrsg. S. Wischmann, E. A. Hartmann), S. 221-231. Springer Vieweg, Berlin. ISBN: 978-3-662-49265-9.
- Erlebach, R. & Hoch, J. (2017). Digitalisierung in der berufsschulischen Ausbildung – Stand, Möglichkeiten und Entwicklungen. In: BAG-Report, Nr. 2, S. 16-21. ISSN nicht existent. URL: <https://bag-bau-holz-farbe.de/schlagwort/2017/> (16.03.2020).
- Ertel, W. (2016). Grundkurs Künstliche Intelligenz. Springer Vieweg, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-13548-5.
- Eschenbruch, K. (2017). 4D-BIM (Dimensionen von BIM). In: Betonkalender 2018 – Building Information Modeling (Hrsg. K. Bergmeister, F. Fingerloos, J.-D. Wörner), S. 385-395. Ernst & Sohn, Berlin. ISBN: 978-3-433-03160-5.

- ETH (2017). Bauen mit Robotern und 3D-Druckern. ETH Zürich. URL: <https://www.ethz.ch/de/news-und-veranstaltungen/eth-news/news/2017/06/bauen-mit-robotern.html> (12.03.2020).
- Faber, M. & Mertens, A. (2018). Auf dem Weg in ein neues Produktionszeitalter. In: IAW Spektrum Juli 2018 (Hrsg. Institut für Arbeitswissenschaft der RWTH Aachen), S. 6-7. ISSN nicht existent. URL: <https://iaw-aachen.de/index.php/de/Spektrum.html> (12.03.2020).
- Faro (2018). Handgeführter Faro Scanner Freestyle 3D – Internetseite der Firma Faro. URL: www.faro.com/de-de/produkte/bausektor-bim-cim/faro-scanner-freestyle3d-x/ (12.03.2020).
- Fastbrick (2019). Medienunterlagen auf der Internetseite des Unternehmens Fastbrick Robotics. URL: <https://www.fbr.com.au/view/media-centre> (16.03.2020).
- Fellner, D. W. (2018). Virtuelle Realität in Medien und Technik. In: Digitalisierung – Schlüsseltechnologien für Wirtschaft und Gesellschaft (Hrsg. R. Neugebauer), S. 19-42. Springer, Wiesbaden. ISBN: 978-3-662-55889-8.
- Fieldwire (2018). Field Management Software for Construction Teams – Internetseite des Unternehmens Fieldwire. URL: <https://www.fieldwire.com/> (16.03.2020).
- Fischer, M. (2006). Arbeitsprozesswissen. In: Handbuch Berufsbildungsforschung (Hrsg. F. Rauner), S. 308-315. Bertelsmann, Bielefeld. ISBN: 3-7639-3463-4.
- Flick, U. (2014). Qualitative Sozialforschung – Eine Einführung. Rowohlt, Reinbek. ISBN: 978-3-499-55694-4.
- Forbau (2012). Die Digitale Baustelle – Effizienter Bauen mit digitalen Werkzeugen. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/1560/1c45233f95dd4345877d988d4ffd1cc5f623.pdf> (16.03.2020).
- Formitas (2018). Virtual und Augmented Reality in der Baubranche. URL: <https://formitas.de/services/virtual-argumented-reality/> (16.03.2020).
- Fourastié, J. (1963). Die große Hoffnung des 20. Jahrhunderts. In: Philosophie der Arbeit (2017) (Hrsg. M. Aßländer; B. Wagner). S. 386-397. Suhrkamp, Berlin. ISBN: 978-3-518-29801-5.
- Fröch, G., Gächter, W., Tautschnig, A. & Specht, G. (2019). Merkmalsserver im Open-BIM-Prozess. In: Bautechnik, Band 96, S. 338-347. Ernst & Sohn, Berlin. ISSN: 0932-8351 DOI: 10.1002/bate.201800092.
- Fredenlund, L. (2017). Investing in the BIM education of experts. Is it worth it? In: BIM Today, Nr. 10, S. 71-72. URL: <https://www.pbctoday.co.uk/news/publications/bim-today/bim-today-may-2017/32965/> (16.03.2020).

- Frenz, M., Heinen, S. & Schlick, C. M. (2015). Industrie 4.0: Anforderungen an Fachkräfte in der Produktionstechnik. In: BiBB: BWP 6, S. 12-16. URL: <https://www.bibb.de/veroeffentlichungen/de/publication/download/7847> (16.03.2020).
- Frey, C. B. & Osborne, M. A. (2013). Working Paper: The Future of Employment: How susceptible are jobs to computerisation? URL: http://sep4u.gr/wp-content/uploads/The_Future_of_Employment_ox_2013.pdf (29.09.2018).
- Frey, C. B. & Osborne, M. A. (2016). The future of employment: How susceptible are jobs to computerisation? In: Technological Forecasting & Social Change, Band 114, S. 254-280. Elsevier, Amsterdam. ISSN: 0040-1625.
- Frick, K. & Tenger, D. (2015). Smart Home 2030 – Wie die Digitalisierung das Bauen und Wohnen verändert. Gottlieb Duttweiler Institute, Zürich URL: https://www.gdi.ch/sites/default/files/documents/2018-10/151103_smarthome_summary_d_web.pdf (16.03.2020).
- Futuromat (2019). Job-Futuromat des Instituts für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung. URL: <https://job-futuromat.iab.de/> (16.03.2020).
- Gabriel, S. (2015). Die Politik eines neuen Betriebssystems. In: Technologischer Totalitarismus, S. 205-216. Suhrkamp, Berlin. ISBN: 978-3-518-07434-3.
- Ganschar, O., Gerlach, S., Hämmerle, M., Krause, T. & Schlund, S. (2013). Produktionsarbeit der Zukunft – Industrie 4.0. (Hrsg. D. Spath) IAO, Stuttgart. ISBN: 978-3-8396-0570-7.
- Gasteiger, A. (2015). BIM in der Bauausführung. Univ.-Press, Innsbruck. ISBN: 978-3-902-93660-8.
- Gausemeier, J. & Kage, M. (2017). Innovationsroadmapping am Beispiel der Additiven Fertigung. In: Technologie Roadmapping (Hrsg. G. Möhrle, R. Isenmann), S. 291-305, Springer, Wiesbaden. ISBN: 978-3-662-52708-5.
- Gayvoronskaya, T., Bauer, M., Talmeier, M. & Meinel, C. (2016). Wie digitale Weiterbildungsangebote kleinen und mittleren Unternehmen bei der Digitalisierung helfen können In: Wissenschaft trifft Praxis – Ausgabe 5 (Hrsg. Begleitforschung Mittelstand Digital), S. 24-29. URL: <https://www.mittelstand-digital.de/MD/Redaktion/DE/Publikationen/Wissenschaft-trifft-Praxis/magazin-wissenschaft-trifft-praxis-ausgabe5.html> (16.03.2020).
- Gensicke, M., Bechmann, S., Härtel, M., Schubert, T., García-Wülfing, I. & Güntürk-Kuhl, B. (2016). Digitale Medien in Betrieben – heute und morgen. URL: <https://www.bibb.de/veroeffentlichungen/de/publication/show/8048> (16.03.2020).
- Geoslam (2018). 3D-Scanning-Methoden auf der Internetseite des Unternehmens Geoslam. URL: <https://geoslam.com/> (16.03.2020).

- Gerrard, N. (2019). BIM Level 2 uptake among private clients starts to rise. URL: <http://www.bimplus.co.uk/analysis/bim-level-2-uptake-among-private-clients-starts-ri/> (16.03.2020).
- Gillies, C. (2017). Baustelle Digitalisierung. In: Verkehrs Rundschau, Nr. 17, S. 18-19. ISSN: 0341-2148.
- Glock, C. (2018). Digitalisierung im konstruktiven Bauwesen. In: Beton- und Stahlbetonbau, Band 113, S. 614-622. Ernst & Sohn, Berlin. ISSN: 0005-9900. DOI: 10.1002/best.201800021.
- Günthner, W. A. & Schneider, O. (2013). RFID-Einsatz in der Baubranche – Entwicklung eines RFID-Systems mit mobilen Gates auf Baustellen zur schnellen Identifikation und Verfolgung von Betriebsmitteln zwischen Baustellen und Werken. URL: mediatum.ub.tum.de/doc/1187951/fml_20131230_142_export.pdf (16.03.2020).
- Goger, G., Piskernik, M. & Urban, H. (2018). Potenziale der Digitalisierung im Bauwesen (Studie des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie der TU Wien). URL: <https://nachhaltigwirtschaften.at/de/publikationen/schriftenreihe-2018-02-studie-potenziale-der-digitalisierung.php> (16.03.2020).
- Golabchi, A., Han, S. & AbouRizk, S. (2018). A simulation and visualization-based framework of labor efficiency and safety analysis for prevention through design and planning. In: Automation in Construction, Vol. 96, S. 310–323. ISSN: 0926-5805. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.10.001.
- Golinski, R.-S. (2019). Ergebnisse der BIM-Umfrage bei Teilnehmern der BIM World Munich 2018. URL: <https://www.baulinks.de/bausoftware/2019/0003.php4> (16.03.2020).
- Graßler, L. & Beaujean, P. (2016). Strukturierte Umsetzung nachhaltiger Verbesserungen durch Six Sigma. In: Wissenschaft trifft Praxis – Ausgabe 5 (Hrsg. Begleitforschung Mittelstand Digital), S. 60-63. URL: <https://www.mittelstand-digital.de/MD/Redaktion/DE/Publikationen/Wissenschaft-trifft-Praxis/magazin-wissenschaft-trifft-praxis-ausgabe5.html> (16.03.2020).
- Gschösser, F., Baldauf, P., Tautschnig, A. & Reinisch, A. (2019). Baubetriebliche und bauwirtschaftliche Potentiale durch Echtzeitmessung der Betonfestigkeit. In: Bautechnik, Heft 3, S. 239-249. ISSN: 0932-8351. DOI: 10.1002/bate.201800073.
- Haas, J. (2017). BIM erreicht den Mittelstand. In: THIS, Nr. 8, S. 70-71. Bauverlag, Gütersloh. ISSN nicht existent. URL: <https://www.bauverlag.de/> (16.03.2020).
- Hacker, W. (2014). Allgemeine Arbeitspsychologie – Psychische Regulation von Tätigkeiten (3. Aufl.). Hogrefe, Göttingen. ISBN: 978-3-8017-2540-2.
- Hafner, S. & Berlack, J. (2018). Wirkungsweisen und Hemmnisse in den Prozessen – Digitalisierung und Produktivitätssteigerung in der Bauausführung. In: Deutsches Ingenieurblatt, Nr. 6, S. 48-56. Schiele & Schön, Berlin, ISSN: 0946-2422.

- Haghsheno, S., Deubel, M. & Spenner, L. (2019). Digitale Technologien und deren Wertschöpfungspotenziale für die Bauwirtschaft. In: Bauingenieur, Band 94, S. 45-55. ISSN: 0005-6650.
- Hammermann, A. & Klös, H.-P. (2016). Digitalisierung und Arbeitsmarkt: Stellungnahme für die Enquetekommission „Zukunft von Handwerk und Mittelstand in NRW“ des Landtages NRW (IW-Report, Nr. 8/2016). URL: <http://hdl.handle.net/10419/157169> (17.03.2020).
- Hammermann, A. & Stettes, O. (2015). Fachkräftesicherung im Zeichen der Digitalisierung (Hrsg. Institut der deutschen Wirtschaft Köln). URL: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/F/fachkraeftesicherung-im-zeichen-der-digitalisierung.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (17.03.2020).
- Handl, A. & Kuhlenkasper, T. (2018). Einführung in die Statistik. Springer, Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-662-56439-4.
- Harten, U., Böhme, S., Schaade, P. & Wiethölter, D. (2018). Die regionale Bedeutung des Handwerks für Beschäftigung und Ausbildung. URL: www.iab-forum.de/die-regionale-bedeutung-des-handwerks-fuer-beschaeftigung-und-ausbildung/ (17.03.2020).
- Hartmann, K. (2015). Einführung in die Expertensystem-Technologie. Hochschulverlag, Merseburg. ISBN: 978-3-942-70337-6.
- Hausknecht, K. & Liebich, T. (2016). BIM-Kompodium – Building Information Modeling als neue Planungsmethode. IRB-Verlag, Stuttgart. ISBN: 978-3-816-79489-9.
- Hausstädtler, U. (2010). Der Einsatz von Virtual Reality in der Praxis – Handbuch für Studenten und Ingenieure (2. Aufl.). Rhombos-Verlag, Berlin. ISBN: 978-3-941-21614-3.
- Häder, M. & Häder, S. (2014). Stichprobenziehung in der quantitativen Sozialforschung. In: Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung (Hrsg. N. Baur, J. Blasius), S. 283-297. Springer, Wiesbaden. ISBN 978-3-531-17809-7.
- Heintze, A. (2017). Branche mit digitalen Baustellen. In: Verkehrs Rundschau, Heft 6, S. 14–17. ISSN: 0341-2148.
- Helm, V. (2014). In-situ-Fabrikation – Neue Potenziale roboterbasierter Bauprozesse auf der Baustelle (Dissertation an der Kunsthochschule für Medien Köln). URL: https://e-publications.khm.de/files/3/141031_InsituFabrikation_Diss_Helm.pdf (17.03.2020).
- Helmrich, R. (2010). Beruf und Qualifikation in der Zukunft – BIBB-IAB-Modellrechnungen zu den Entwicklungen in Berufsfeldern und Qualifikationen bis 2025. Bertelsmann, Bielefeld. ISBN: 978-3-7639-1137-0.
- Helmus, M. (2009). RFID in der Baulogistik. Vieweg + Teubner, Wiesbaden ISBN: 978-3-834-80765-6.

- Helmus, M. (2011). RFID-Bauglogistikleitstand. Vieweg + Teubner, Wiesbaden. ISBN: 978-3-8348-1577-4.
- Henke, K. (2018). Beton aus dem 3D-Drucker. In: beton, Nr. 1+2, S. 34-35. Bau+Technik, Erkrath. ISSN nicht existent. URL: <https://www.verlagbt.de/verlag/beton/mediadaten/index.php?navid=20> (17.03.2020).
- Herkner, V. (2013). Forschungen zur Kategorie „Facharbeiter/-in“. In: Handbuch Berufsforschung (Hrsg. J.-P. Pahl, V. Herkner), S. 327–338. Bertelsmann, Bielefeld. ISBN: 978-3-7639-5094-2.
- Herre, J. & Pfeiffer, H. (2015). BIM bei Wolff und Müller. In: Building Information Modeling (Hrsg. A. Borrmann, M. König, C. Koch, J. Beetz), S. 519-530. Springer, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-05605-6.
- Herter, L. & Silbe, K. (2017a). Kommunikation und Dokumentation. In: BIM-Ratgeber für Bauunternehmer (Hrsg. K. Silbe, J. Díaz), S. 65-116. Rudolf Müller, Köln. ISBN: 978-3-481-03566-2.
- Herter, L. & Silbe, K. (2017b). Erforderliche Hardware und Software. In: BIM-Ratgeber für Bauunternehmer (Hrsg. K. Silbe, J. Díaz), S. 37-48. Rudolf Müller, Köln. ISBN: 978-3-481-03566-2.
- Hägele, T. (2002). Modernisierung handwerklicher Facharbeit am Beispiel des Elektroinstallateurs. Inauguraldissertation (17.07.2002). Universität Hamburg.
- Highfield, B. (2018). Architecture is on the right road to exploiting digital advances. URL: www.bimplus.co.uk/people/architecture-right-road-exploiting-digital-advance/ (17.03.2020).
- Hirsch-Kreinsen, H., Hompel, M., Ittermann, P., Dregger, J. & Niehaus, J. (2018). Social Manufacturing and Logistics – Arbeit in der digitalisierten Produktion. In: Zukunft der Arbeit – Eine praxisnahe Betrachtung (Hrsg. S. Wischmann, E. A. Hartmann), S. 175–194. Springer, Berlin. ISBN: 978-3-662-49265-9.
- Holst, R. (2018). Grundlagen – Einsatzgebiete – rechtliche Rahmenbedingungen für Drohnensysteme. In: Bautechnik, Band 95, S. 699-704. Ernst & Sohn, Berlin. ISSN: 0932-8351. DOI: 10.1002/bate.201800067.
- Honda (2019). Internetseite des Unternehmens Honda zur Vorstellung des Roboters Asimo. URL: <https://global.honda/innovation/robotics/ASIMO.html> (17.03.2020).
- Huhnt, W. (2014). Digitalisierung im Bauwesen: Thema für Baupraxis, Lehre und Forschung. 1. Grazer BIM-Tagung der Technische Universität Graz. URL: <https://www.tugraz.at/institute/bbw/institut/rueckblick/archiv-2014/> (17.03.2020).

- HWK Erfurt (2016). Digitalisierung im Thüringer Handwerk 2016 – Maurer und Betonbauer. URL: <https://www.handwerk-magazin.de/potenziale-der-digitalisierung-der-bauhauptgewerke/383/1558/download> (12.09.2020).
- IFB (2015). Analyse der Entwicklung der Bauschäden und der Bauschadenkosten (Hrsg. IFB). URL: https://www.bsb-ev.de/fileadmin/user_upload/Bauherren-Schutzbund/Aktuell/Studien/15_Forschungsbericht_IFB_Bauschaeden_und_Bauschadenkosten_2015.pdf (17.03.2020).
- Igloo (2019). Virtual Reality-CAVE-Lösungen des Unternehmens Igloo Vision. URL: <https://www.igloovision.com/> (17.03.2020).
- IKE (2019). Spike Smart Laser auf der Internetseite des Unternehmens IKE GPS. URL: <https://ikegps.com/spike/> (17.03.2020).
- Jehle, P., Michailenko, N., Seyffert, S. & Wagner, S. (2013). IntelliBau 2 – Das intelligente Bauteil im integrierten Gebäudemodell. Springer Vieweg, Wiesbaden. ISBN: 978-3-8348-2400-4.
- Jehle, P., Seyffert, S. & Wagner, S. (2011). IntelliBau – Anwendbarkeit der RFID-Technologie im Bauwesen. Vieweg Teubner, Wiesbaden. ISBN: 978-3-8348-1468-5.
- Jokovic, B. & Stockinger, C. (2016). Kompetenzmanagement in der Arbeitswelt 4.0. In: Wissenschaft trifft Praxis – Ausgabe 5 (Hrsg. Begleitforschung Mittelstand Digital), S. 48-53. URL: <https://www.mittelstand-digital.de/MD/Redaktion/DE/Publikationen/Wissenschaft-trifft-Praxis/magazin-wissenschaft-trifft-praxis-ausgabe5.html> (17.03.2020).
- Jordan, J. (2017). Roboter. University Press, Wiesbaden. ISBN: 978-3-737-41329-9.
- Junge, S. (2018). Digitalisierung von Bewehrungsdaten. In: Bauingenieur, Band 93, S. A 16. ISSN: 0005-6650.
- Karl, C. K. & Spengler, A. J. (2017). Industrie 4.0 in der Bauwirtschaft: Einfluss der automatisierten Gebäudeerstellung auf die gewerbliche Berufsbildung. URL: <https://www.berufsbildung.nrw.de/cms/veroeffentlichungen/hochschultage-bb-2017/fachtagungen/03-bau-holz-farbe-und-raumgestaltung/index.html> (17.03.2020).
- Karl, C. K., Spengler, A. J. & Bruckmann, T. (2017). Industrie 4.0 in der Bauwirtschaft – Einfluss der automatisierten Gebäudeerstellung auf die gewerbliche Berufsbildung. In: Trends beruflicher Arbeit – Digitalisierung, Nachhaltigkeit, Heterogenität, S. 11-33. PubliQation, Norderstedt. ISBN: 978-3-7458-6977-4.
- Karl, R. (2018). Roboter auf dem Bau – geht das? URL: <https://www.baugewerbemagazin.de/it-am-bau/roboter-auf-dem-bau—geht-das-.htm> (17.03.2020).
- Kellner, F. (2018). Sechs neue Handys im Baustellen-Härtetest. Internetseite des Handwerk Magazins. URL: <https://www.handwerk-magazin.de/outdoor-smartphones-handys-im-baustellentest/150/381/208019> (17.03.2020).

- Kewazo (2018). Internetseite des Start Up-Unternehmens Kewazo. URL: <https://www.kewazo.com/> (17.03.2020).
- Kirchhoff, S., Kuhnt, S., Lipp, P. & Schlawin, S. (2010). Der Fragebogen – Datenbasis, Konstruktion und Auswertung (5. Aufl.). Springer, Wiesbaden. ISBN: 978-3-531-16788-6.
- Klaubert, C. (2011). Prozessdatengewinnung auf der Baustelle. In: Digitale Baustelle – innovativer Planen, effizienter Ausführen, S. 237-243. Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-642-16485-9. DOI: 10.1007/978-3-642-16486-6.
- Klemt-Albert, K., Ostermann, J., Munderloh, M. & Bahlau, S. (2018). Digital gestützte Bewehrungsabnahme als Beitrag zur Qualitätssicherung auf Baustellen. In: Bau-technik, Band 95, Heft 3, S. 189-197. ISSN: 0932-8351. DOI: 10.1002/bate.201700096.
- Klieme, E. (2004). Was sind Kompetenzen und wie lassen sie sich messen? In: Pädagogik Band 56, Nr. 6, S. 10-13. Beltz Juventa, Weinheim. ISSN nicht existent. URL: <https://www.beltz.de/fachmedien/paedagogik/zeitschriften/paedagogik.html> (17.03.2020).
- Klindt, L. & Klindt, E. (1999). Was ist am Bau so völlig anders? In: Kein Ärger am Bau – Ein Ratgeber für Bauherren, Planer und Unternehmer (Hrsg. L. Klindt, E. Klindt), S. 4-14. IRB-Verlag, Stuttgart. ISBN: 978-3-8167-4711-6.
- Kloft, H., Empelmann, M., Oettel, V. & Ledderose, L. (2019). Herstellung erster Beton- und Stahlbetonstützen mittels 3D-Betondruck. In: BFT International, Nr. 6, S. 28-37. ISSN nicht existent. URL: <https://www.bauverlag.de/> (17.03.2020).
- Kölzer, T. & Boll, J.-N. (2018). Computergenerierte Realitäten im Bauwesen – Anwendungsgebiete und kategoriale Zuordnungen. In: Ernst & Sohn Special: BIM 2018, S. 42-45. Ernst & Sohn, Berlin. ISSN nicht existent. URL: <https://www.ernst-und-sohn.de/sonderhefte/bim-building-information-modeling-2018> (17.03.2020).
- Kölzer, T. & Ranke, H. (2014). Informatisierung in der Baufacharbeit. In: BAG-Report, Heft 2, S. 38-44. ISSN nicht existent. URL: <https://bag-bau-holzfarbe.de/schlagwort/2014/> (17.03.2020).
- KMK (1999). Rahmenlehrpläne für die Berufsausbildung in der Bauwirtschaft (Hrsg. Kultusministerkonferenz). URL: <https://www.kmk.org/themen/berufliche-schulen/duale-berufsausbildung/downloadbereich-rahmenlehrplaene.html> (17.03.2020).
- KMK (2007). Handreichung für die Erarbeitung von Rahmenlehrplänen der Kultusministerkonferenz für den berufsbezogenen Unterricht in der Berufsschule und ihre Abstimmung mit Ausbildungsordnungen des Bundes für anerkannte Ausbildungsberufe. URL: https://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen_beschluesse/2007/2007_09_01-Handreich-RIpl-Berufsschule.pdf (17.03.2020).

- König, N. (2009). Potenziale von RFID-Technologien im Bauwesen – Kennzahlen und Bauqualität. IRB-Verlag, Stuttgart. ISBN: 978-3-816-78212-4.
- König, N., Philipp, C., Hanisch, B., Ebert, K. & Gier, T. (2015). RFID – eine Schlüsseltechnologie für transparente Bauwerkserstellung und nachhaltigen Gebäudebetrieb. IRB-Verlag, Stuttgart. ISBN: 9783816794097.
- Kohlbecker, G. (2013). Organisation im Bauablauf. IRB-Verlag, Stuttgart. ISBN: 978-3-816-78852-2.
- Koutsogiannis, A. (2018). How Elon Musk and other innovators have pushed the needle in construction. URL: www.bimplus.co.uk/people/how-elon-musk-and-other-innovators-have-pushed-needle/ (17.03.2020).
- Koutsogiannis, A. (2019). Online assessment measures digital maturity of construction businesses. URL: <http://www.bimplus.co.uk/analysis/online-assessment-measures-digital-maturity-constr/> (17.03.2020).
- Krabel, S. (2017). Arbeitsmarkt und Digitalisierung – Wie man benötigte digitale Fähigkeiten am Arbeitsmarkt messen kann. In: Digitalisierung: Bildung – Technik – Innovation (Hrsg. V. Wittpahl), S. 99-107. Springer, Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-662-52853-2. DOI: 10.1007/978-3-662-52854-9.
- Kraus, M. & Drass, M. (2020a). Künstliche Intelligenz bei Berechnung und Bemessung von Tragwerken. In: Deutsches Ingenieurblatt (12/2020), S. 16-25, ISSN: 0946-2422.
- Kraus, M. & Drass, M. (2020b). Künstliche Intelligenz im Bauwesen – Hintergründe, Status Quo und Potenziale. In: Bauingenieur (95), S. 369-378. ISSN: 0005-6650.
- Krause, C. (2016). Prozesse 4.0 – Kreativität, Problemlösekompetenz und Prozessdenken als Grundlage des digitalen Wandels. In: Wissenschaft trifft Praxis – Ausgabe 5 (Hrsg. Begleitforschung Mittelstand Digital), S. 37–41. URL: <https://www.mittelstand-digital.de/MD/Redaktion/DE/Publikationen/Wissenschaft-trifft-Praxis/magazin-wissenschaft-trifft-praxis-ausgabe5.html> (17.03.2020).
- Krause, D. (2017). 4D-BIM (Dimensionen von BIM). In: Building Information Modeling – Überblick über Technologie und Arbeitsmethodik mit Praxisbeispielen – Betonkalender 2018 (Hrsg. K. Bergmeister, F. Fingerloos, J.-D. Wörner), S. 373-378. Ernst & Sohn, Berlin. ISBN: 978-3-433-03160-5.
- Krause, M. & Otto, J. (2019). Digitales Prozessmodell beim Beton-3D-Druck. In: Bauingenieur, Band 94, S. 171-178. ISSN: 0005-6650.
- Krebs, D. & Menold, N. (2014). Gütekriterien quantitativer Sozialforschung. In: Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung (Hrsg. N. Baur, J. Blasius), S. 425-438. Springer, Wiesbaden. ISBN 978-3-531-17809-7.

- Krüger, W. (2017). Was bedeuten Digitalisierung und Industrie 4.0 für den Mittelstand? In: Digitalisierung und Industrie 4.0 – Herausforderungen für den Mittelstand (Hrsg. A. Dreier, R. Merk, B. Seel), S. 5-12. FHM, Bielefeld. URL: https://www.fh-mittelstand.de/fileadmin/pdf/Schriftenreihe/Heft_8.pdf (17.03.2020).
- Krings, B.-J. & Fiedeler, U. (2005). Informatisierung der Arbeit: Gesellschaft im Umbruch. In: Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis (Hrsg. Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse), Nr. 2, S. 120-123. URL: <https://www.tatup-journal.de/downloads/2005/tatup052.pdf> (18.03.2020).
- Kruppe, T., Leber, U. & Matthes, B. (2017). Sicherung der Beschäftigungsfähigkeit in Zeiten des digitalen Umbruchs. IAB, Nürnberg. ISBN: 2195-5980. URL: <http://doku.iab.de/stellungnahme/2017/sn0717.pdf> (18.03.2020).
- Kruse, W. (1986). Von der Notwendigkeit des Arbeitsprozeß-Wissens. In: Bildung für eine menschliche Zukunft, S. 188-193. Juventa, Weinheim. ISBN: 3-7799-0670-8.
- Ladel, S., Knopf, J. & Weinberger, A. (2018). Digitalisierung und Bildung. Springer, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-18332-5. DOI: 10.1007/978-3-658-18332-5.
- Lamnek, S. (2010). Qualitative Sozialforschung (5. Aufl.). Beltz, Weinheim. ISBN: 978-3-621-27840-9.
- Landmann, J. & Heumann, S. (2016). Auf dem Weg zum Arbeitsmarkt 4.0? – Mögliche Auswirkungen der Digitalisierung auf Arbeit und Beschäftigung in Deutschland bis 2030. Bertelsmann, Gütersloh. URL: <https://www.bertelsmannstiftung.de/de/publikationen/publikation/did/auf-dem-weg-zum-arbeitsmarkt-40/> (17.03.2020).
- LAZ (2018). HRP-5P: Der arbeitsfähige humanoide Roboter (Internetseite der Lausitzer Allgemeinen Zeitung). URL: <https://www.lausitzer-allgemeine-zeitung.org/hrp-5p-der-arbeitsfaehige-humanoide-roboter/> (17.03.2020).
- Leica (2019). Präsentation verschiedener Baulaser auf der Internetseite des Unternehmens Leica Geosystems. URL: <https://leica-geosystems.com/de-de/products/lasers> (17.03.2020).
- Lenk, H. & Ropohl, G. (1993). Technik und Ethik (2. Aufl.). Reclam, Stuttgart. ISBN: 978-3-150-08395-6.
- Lenzen, M. (2020). Künstliche Intelligenz – Fakten, Chance, Risiken. C. H. Beck, München. ISBN: 978-3-406-75124-0.
- Leopoldseder, T. (2016). BIM Best Practice für die Fertigteilindustrie. In: Ernst & Sohn Special 2016 – BIM, S. 130-132. Ernst & Sohn, Berlin. ISSN nicht existent. URL: <https://www.ernst-und-sohn.de/sonderhefte/bim-building-information-modeling-2016> (17.03.2020).

- Li, F., Zlatanova, S., Koopman, M., Bai, X. & Diakit , A. (2018). Universal path planning for an indoor drone. In: Automation in Construction, Band 95, S. 275-283. ISSN: 0926-5805. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.07.025.
- Lindemann, H.-J. & Syben, G. (2019). Ausbildung und Beruf von Bauzeichner*innen unter dem Einfluss des Building Information Modeling – Eine explorative empirische Untersuchung. BAQ, Bremen. ISBN nicht existent. URL: <https://www.baq-bremen.de/de/publikationen.html> (17.03.2020).
- Lissmann, U. (2013). Befragungsmethode. In: Handbuch Berufspädagogische Diagnostik (Hrsg. A. Frey, U. Lissmann, B. Schwarz). Beltz Verlag, Weinheim. ISBN: 978-3-407-83173-6.
- Loeffler, U. & von der Heyde, C. (2014). Ein Kurz-Überblick über die gebräuchlichsten Auswahl-Verfahren in der Marktforschung. In: Stichproben-Verfahren in der Umfrageforschung (Hrsg. ADM), S. 19-24. Springer, Wiesbaden. ISBN: 978-3-531-16445-8.
- Mace (2017). Perspectives: Insights 2017 – Moving to Industry 4.0: A skills revolution. URL: <https://www.macegroup.com/perspectives/171027-moving-to-industry-40> (17.03.2020).
- Macherey, M. & Middendorf, T. (2019). Ohne Moos nichts los. In: Bauhandwerk Nr. 1, S. 58-59. ISSN nicht existent. URL: <https://www.bauverlag.de/> (17.03.2020).
- Mai, C.-M. & Schwahn, F. (2017). Bauwirtschaft – konjunkturelle Entwicklungen der letzten 25 Jahre im Fokus der Statistik. In: VDI-Bautechnik. Springer VDI, Düsseldorf. Jahresausgabe, S. 10-16. ISSN nicht existent.
- Malone, D. (2017). Augmented Reality: Three VR + AR innovations to watch. URL: <https://www.bdcnetwork.com/three-vr-ar-innovations-watch> (17.03.2020).
- Manzo, J., Manzo, F. & Bruno, R. (2018). The Potential Economic Consequences of a Highly Automated Construction Industry. URL: <https://midwestepi.files.wordpress.com/2018/01/the-economic-consequences-of-a-highly-automated-construction-industry-final.pdf> (17.03.2020).
- Marx, A. (2000). P dagogische  berlegungen zum Technischen Zeichnen im Technikunterricht der allgemeinbildenden Schulen (Dissertation an der Hochschule Freiburg).
- Matterport (2018). Turner & Townsend launches Virtual 3D documentation with Matterport technology. URL: <https://matterport.com/news/turner-townsend-launches-virtual-3d-documentation-matterport-technology> (17.03.2020).
- McDonnell, M. (2017). Pioneering a revolutionary augmented reality system, built for the construction industry. In: BIM Today, Nr. 12, S. 88-90. URL: <https://www.pbctoday.co.uk/news/publications/pbc-today/pbc-today-october-2017/35505/> (18.03.2020).

- McGraw (2014). Smart Market Report: The Business Value of BIM for Construction in Major Global Markets. McGraw Hill Construction. URL: <https://bimforum.org/wp-content/uploads/2012/12/MHC-Business-Value-of-BIM-in-North-America-2007-2012-SMR.pdf> (18.03.2020).
- Mechtcherine, V. & Nerella, V. N. (2018a). 3-D-Druck mit Beton: Sachstand, Entwicklungstendenzen, Herausforderungen. In: Bautechnik, Nr. 4, S. 275-287. ISSN: 0932-8351.
- Mechtcherine, V. & Nerella, V. N. (2018b). Integration der Bewehrung beim 3D-Druck mit Beton. In: Beton- und Stahlbetonbau, Band 113, S. 496-504. ISSN: 0005-9900. DOI: 10.1002/best.201800003.
- Mehler-Bicher, A. & Steiger, L. (2014). Augmented Reality – Theorie und Praxis (2. Aufl.). De Gruyter Oldenbourg, München. ISBN: 978-3-11-035384-6.
- Menges, A., Kyjanek, O. & Schwinn, T. (2019). Mensch-Roboter-Kooperation im Holzbau: Potenziale für die Vorfertigung. In: Zukunft Bau (Bonn), S. 10-11. URL: <https://www.zukunftbau.de/> (18.03.2020).
- Mersch, F. F. (2016). Berufswissenschaftliche Anforderungen und Aufgaben im Bauwesen. In: Zwischen Inklusion und Akademisierung – aktuelle Herausforderungen für die Berufsbildung (Hrsg. S. Baabe-Meijer, W. Kuhlmeier, J. Meyser), S. 156-179. BoD, Norderstedt. ISBN: 978-3-738-68082-9.
- Mersch, F. F. & Kulcke, M. (2014). Expertenwissen im Bau erheben, sichern und nutzen. In: BAG-Report, Band 16, S. 25-31. URL: <https://bag-bau-holzfarbe.de/schlagwort/2014/> (18.03.2020).
- Metz, J. (2017). Aus der Vogelperspektive – Einsatz von Drohnen zur Gebäudeinspektion. In: der bauschaden, Nr. 25, S. 49-51. Forum Verlag, Merching. ISSN: 2196-4610. URL: <https://www.derbauschaden.de/einzelausgaben/> (18.03.2020).
- Meyser, J. (2010). Berufsbildung in der Bauwirtschaft: Qualität – Innovation – Leistungsfähigkeit. In: Die Vision einer lernenden Branche im Leitbild Bauwirtschaft – Kompetenzentwicklung für das Berufsfeld Planen und Bauen (Hrsg. G. Syben), S. 55–74. Edition Sigma, Berlin. ISBN: 978-3-8360-3574-3.
- Meyser, J. & Uhe, E. (2006). Bautechnik, Holztechnik, Farbtechnik und Raumgestaltung. In: Handbuch Berufsbildungsforschung (Hrsg. F. Rauner), S. 150-155. Bertelsmann, Bielefeld. ISBN 3-7639-3463-4.
- Microsoft (2019). Internetseite des Unternehmens Microsoft für die Präsentation der AR-Brille Hololens 2. URL: <https://www.microsoft.com/de-de/hololens> (18.03.2020).
- Mikeleit, V. (2018). Digitale Lösungen für ein wirtschaftliches Bauen im Bestand – Bestandserfassung mit Drohnen. In: Computer Spezial, Nr. 1/2018. ISSN nicht existent. URL: <https://www.computer-spezial.de/> (18.03.2020).

- MIT (2018). Blind Cheetah 3 robot can climb stairs littered with obstacles. URL: <http://news.mit.edu/2018/blind-cheetah-robot-climb-stairs-obstacles-disaster-zones-0705> (18.03.2020).
- Möller, J. (2015). Verheißung oder Bedrohung – Die Arbeitsmarktwirkungen einer vierten industriellen Revolution. IAB, Nürnberg, Nr. 18. ISSN: 2195-2663 URL: <http://doku.iab.de/discussionpapers/2015/dp1815.pdf> (18.03.2020).
- Müller, M. (2012). Kleines Fremdwörterbuch. Reclam, Stuttgart. ISBN: 978-3-150-18462-2.
- Mohr, N., Morawiak, D., Köster, N. & Saß, B. (2017). Die Digitalisierung des deutschen Mittelstands (Hrsg. McKinsey Company). URL: <https://www.mckinsey.com/de/news/presse/digitalisierung-im-mittelstand-erhoht-wachstum-in-deutschland-um-03-prozentpunkte-pro-jahr> (18.03.2020).
- Moosbrugger, H. & Kelava, A. (2012). Testtheorie und Fragebogenkonstruktion (2. Aufl.). Springer, Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-642-20071-7.
- Morrison (2018). Morrison Construction invests in Virtual Reality Induction to improve safety on site. URL: <http://www.morrisonconstruction.co.uk/media-centre/morrison-construction-invests-in-virtual-reality-induction-to-improve-safety-on-site/> (18.03.2020).
- Mättig, B., Jost, J. & Kirks, T. (2018). Erweiterte Horizonte – Ein technischer Blick in die Zukunft der Arbeit. In: Zukunft der Arbeit – Eine praxisnahe Betrachtung (Hrsg. S. Wischmann, E. A. Hartmann), S. 63-72. Springer Vieweg, Berlin. ISBN: 978-3-662-49265-9.
- Mulatz, R. (2018). Sinnvoller Einsatz auch im Handwerk. URL: <https://www.handwerk-magazin.de/sinnvoller-einsatz-auch-im-handwerk/150/381/373619> (18.03.2020).
- Mytzek, R. (2004). Überfachliche Qualifikationen – Konzepte und internationale Trends. In: Soft Skills – Überfachliche Qualifikationen für betriebliche Arbeitsprozesse (Hrsg. H.-J. Bullinger, R. Mytzek, B. Zeller), S. 17-37. Bertelsmann, Bielefeld. ISBN: 3-7639-3234-8.
- Nagl, W., Titelbach, G. & Valkova, K. (2017). Digitalisierung der Arbeit: Substituierbarkeit von Berufen im Zuge der Automatisierung durch Industrie 4.0 (Hrsg. IHS Wien). URL: https://www.ihs.ac.at/fileadmin/public/2016_Files/Documents/20170412_IHS-Bericht_2017_Digitalisierung_Endbericht.pdf (18.03.2020).
- NASA (2015). Internetseite der National Aeronautics and Space Administration (NASA) zur Präsentation des Humanoiden RoboSimian. URL: <https://www.nasa.gov/jpl/robosimian-drives-walks-and-drills-in-robotics-finals> (18.03.2020).

- NBS (2017). National BIM Report 2017. URL: <https://www.thenbs.com/knowledge/nbs-national-bim-report-2017> (18.03.2020).
- NBS (2019). Construction Technology Report 2019 (Hrsg. RIBA Enterprises). URL: <https://www.thenbs.com/knowledge/nbs-construction-technology-report-2019> (18.03.2020).
- Nickolaus, R. & Seeber, S. (2013). Berufliche Kompetenzen: Modellierungen und diagnostische Verfahren. In: Handbuch Berufspädagogische Diagnostik (Hrsg. A. Frey, U. Lissamann, B. Schwarz), S. 166-195. Beltz, Weinheim. ISBN: 978-3-407-83173-6.
- Oesterreich, T. D. & Teuteberg, F. (2016). Chancen und Risiken der Digitalisierung in der Bauindustrie im Kontext von Industrie 4.0 – Situationsanalyse und Zieldefinition im Zuge einer Technikfolgenabschätzung (Hrsg. H. C. Mayr, M. Pinzger), S. 1429–1443. In: Informatik 2016, Bonn. ISSN: 1617-5468. URL: <https://dl.gi.de/handle/20.500.12116/1031> (18.03.2020).
- Ong, S. (2017). Beginning Windows Mixed Reality Programming. Apress, Berkley. ISBN: 978-1-4842-2768-8. DOI: 10.1007/978-1-4842-2769-5.
- Oregon (2019). Internetseite der Oregon State University zur Vorstellung des Roboters Cassie. URL: <https://mime.oregonstate.edu/research/drl/robots/cassie/> (18.03.2020).
- Pan, Y. & Zhang, L. (2021). Roles of artificial intelligence in construction engineering and management: A critical review and future trends. In: Automation in Construction (122), S. 1-22. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103517.
- Panasonic (2018). Toughbook FZ-M1 Thermal – Internetseite des Unternehmens Panasonic. URL: <https://business.panasonic.de/computerloesungen/fz-m1-thermal-imaging-solution> (18.03.2020).
- Peddie, J. (2017). Augmented Reality – Where we will all live. Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-319-54501-1.
- PERI (2019). PERI Extended Experience – Internetseite des Schalungsherstellers PERI. URL: <https://www.peri.com/en/products/software-and-apps/peri-extended-experience.html> (18.03.2020).
- Peters, O., Mühlbach, J. & Körndle, H. (2017). BIM im Bauhandwerk: Trainingskonzepte für die Qualifizierung von Bauhandwerker_innen in der modellbasierten Arbeitsweise. In: BAG-Report, Nr. 19, S. 26-33. ISSN nicht existent. URL: <https://bag-bau-holzfarbe.de/schlagwort/2017/> (18.03.2020).
- Petersen, T. (2014). Der Fragebogen in der Sozialforschung. UVK, Konstanz, München. ISBN: 978-3-825-24129-2.
- Petruck, H. (2016). CoWorkAs – Kollaborativer Montagearbeitsplatz. In: IAW-Spektrum Juli 2016 (Hrsg. RWTH), S. 10. ISSN: 2193-7222. URL: <https://iaw-aachen.de/index.php/de/Spektrum.html> (18.03.2020).

- Pfeiffer, I. & Wesling, M. (2016). Das Handwerk in Zeiten der Digitalisierung – Beruflich qualifizierte Fachkräfte sind und bleiben das A und O. In: Wissenschaft trifft Praxis – Ausgabe 5 (Hrsg. Begleitforschung Mittelstand Digital), S. 30-36. ISBN: 2198-8544. URL: <https://www.mittelstand-digital.de/MD/Redaktion/DE/Publikationen/Wissenschaft-trifft-Praxis/magazin-wissenschaft-trifft-praxis-ausgabe5.html> (18.03.2020).
- Pfeiffer, S. (2010). Technisierung von Arbeit. In: Handbuch Arbeitssoziologie (Hrsg. F. Böhle, G. Voß, G. Wachtler; 1. Aufl.), S. 231–262. VS-Verlag, Wiesbaden. ISBN: 978-3-531-15432-9.
- Pflug, C. & Schreyer, M. (2015). Building Information Modeling bei Max Bögl. In: Building Information Modeling (Hrsg. A. Borrmann, M. König, C. Koch, J. Beetz), 491–498. Springer Vieweg, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-05605-6.
- Pilling, A. (2019). BIM – Das digitale Miteinander (3. Aufl.). Beuth, Berlin. ISBN: 978-3-410-29152-7.
- Pittich, D. (2010). Arbeitsprozesswissen. In: Berufsbildung – Zeitschrift für Theorie-Praxis-Dialog, Heft 124, S. 33. Eusl-Verlagsgesellschaft, Detmold. ISSN: 0005-9536.
- Planen Bauen 4.0 (2015a). Konzept zur schrittweisen Einführung moderner, IT-gestützter Prozesse und Technologien bei Planung, Bau und Betriebs von Bauwerken. URL: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/DG/Digitales/bim-stufenplan-endbericht.html> (18.03.2020).
- Planen Bauen 4.0 (2015b). Zwischenbericht zur Einführung des Stufenplans Digitales Bauen und Planen (Workshop I: Erarbeitung eines Konzepts). URL: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/DG/Digitales/bim-zwischenberichte-stufenplan.html> (18.03.2020).
- Plank, C., Stockbauer, W., Hirzinger, G. & Strackenbrock, B. (2011). Digitales Gelände-modell – moderne Methoden der Erfassung und Verarbeitung. In: Digitale Baustelle – innovativer Planen, effizienter Ausführen (Hrsg. W. Günthner, A. Borrmann), S. 43-60. Springer, Heidelberg. ISBN: 978-3-642-16485-9.
- Poppy, W., Böhm, F. & Loebel, W. (1995). Bauautomatisierung und Robotik. In: Archplus Baufokus, Ausgabe-Nr. 128, S. 93-103. ISSN: 0587-3452. URL: <https://www.archplus.net/home/archiv/artikel/46,1104,1,0.html> (18.03.2020).
- Porschen, S. (2008). Austausch impliziten Erfahrungswissens – Neue Perspektiven für das Wissensmanagement (1. Aufl.). VS-Verlag, Wiesbaden. ISBN: 978-3-531-15800-6.
- Porst, R. (2014). Fragebogen. Springer, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-02117-7. DOI: 10.1007/978-3-658-02118-4.
- Potpara, M. & Silbe, K. (2017). Informationsübergabe: Projektorganisation. In: BIM-Ratgeber für Bauunternehmer (Hrsg. K. Silbe, J. Díaz), S. 49-64. Rudolf Müller, Köln. ISBN: 978-3-481-03566-2.

- Prüfer, P., Vazansky, L. & Wystup, D. (2003). Antwortskalen im ALLBUS und ISSP – Eine Sammlung. ZUMA, Mannheim. ISSN: 1610-9953. URL: <https://people.f3.htw-berlin.de/Professoren/Pruemper/pdf/ZUMA-Antwortskalen.pdf> (18.03.2020).
- Prüser, H.-H. (2016). Wie kommt man vom Referenzobjekt zu Lehrinhalten? – Didaktische Aufbereitung am Beispiel von Building Information Modeling. In: Wissenschaft trifft Praxis – Ausgabe 5 (Hrsg. Begleitforschung Mittelstand digital), S. 64-72. ISSN: 2198-8544. URL: <https://www.mittelstand-digital.de/MD/Redaktion/DE/Publikationen/Wissenschaft-trifft-Praxis/magazin-wissenschaft-trifft-praxis-ausgabe5.html> (18.03.2020).
- PWC (2018). Will robots really steal our jobs?. URL: https://www.pwc.com/hu/hu/kiadvanyok/assets/pdf/impact_of_automation_on_jobs.pdf (18.03.2020).
- Ramge, T. (2018). Mensch und Maschine. Reclam, Ditzingen. ISBN: 978-3-150-19499-7.
- Rammert, W. (2016). Technik – Handeln – Wissen (2. Aufl.). Springer, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-11772-6.
- Rathswohl, S. (2014). Entwicklung eines Modells zur Implementierung eines Wissensmanagement-Systems in kleinen und mittleren Bauunternehmen. University Press, Kassel. ISBN: 978-386219-824-5.
- Rauner, F. (2005). Berufswissenschaftliche Arbeitsstudien. In: ITB-Arbeitspapiere, S. 145-161. ITB, Bremen. ISSN: 1615-3138.
- Rauner, F. (2006). Der Gegenstandsbezug: Berufliche Arbeits- und Bildungsprozesse. In: Handbuch Berufsbildungsforschung (Hrsg. F. Rauner), S. 557-562. Bertelsmann, Bielefeld. ISBN: 3-7639-3463-4.
- Rauner, F. (2008). Methoden der Berufsbildungsforschung. In: Forschungsperspektiven in Facharbeit und Berufsbildung, S. 116-138. Peter Lang, Frankfurt. ISBN: 3-631-5-8835-6.
- Rauner, F. (2014). Industrielle Entwicklung – Zukunft der Facharbeit. In: Grenzgänge der Arbeitsforschung (Hrsg. C. Clases, M. Dick, T. Manser, A. Vollmer), S. 45-70. Pabst Science Publishers, Lengerich. ISBN: 978-3-89967-973-1.
- Rauner, F., Bachmann, N., Backhaus, J., Erdwien, B. & Franke, J. (2017). Methodenhandbuch – Messen und Entwickeln beruflicher Kompetenzen (COMET). Bertelsmann, Bielefeld. ISBN: 978-3-763-95817-7.
- Ravencroft, T. (2017). Is 3D printing ready to come of age? (Hrsg. BIM+). URL: www.bimplus.co.uk/technology/3d-printing-it-ready-come-age/ (18.03.2020).
- Realwear (2018). HMT-1 Unser Interface – Internetseite des Unternehmens Realwear. URL: www.realwear.com/products/hmt-1 (18.03.2020).

- Reinecke, J. (2014). Grundlagen der standardisierten Befragung. In: Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung (Hrsg. N. Baur, J. Blasius), S. 601–617. Springer, Wiesbaden. ISBN 978-3-531-17809-7.
- Reinhardt, D., Saunders, R. & Burry, J. (2016). Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016. Springer International Publishing. ISBN 978-3-319-26376-2.
- Rensing, C. (2016). Technologie-gestütztes Lernen am Arbeitsplatz. In: Wissenschaft trifft Praxis – Ausgabe 5 (Hrsg. Begleitforschung Mittelstand Digital), S. 5-11. ISBN: 2198-8544. URL: <https://www.mittelstand-digital.de/MD/Redaktion/DE/Publikationen/Wissenschaft-trifft-Praxis/magazin-wissenschaft-trifft-praxis-ausgabe5.html> (19.03.2020).
- RIBA (2019). National BIM Report 2019 – The definitive industry update (Hrsg. RIBA Enterprises). URL: https://www.thenbs.com/knowledge/national-bim-report-2019?utm_source=NBS+Research&utm_medium=email&utm_campaign=bbdc20bd18-national-bim-report-2019-01 (19.03.2020).
- Ropohl, G. (1993). Technikbewertung als gesellschaftlicher Lernprozeß. In: Technik und Ethik, S. 259–281. Reclam, Stuttgart. ISBN: 3-15-008395-8.
- Röschenkemper, M. (2018). Die Anwendung im Blick behalten – Building information Modeling als Chance. In: THIS, Nr. 1, S. 88-91. Bauverlag, Gütersloh. ISSN nicht existent. URL: <https://www.this-magazin.de/> (19.03.2020).
- Rump (2018). Wandel in der Arbeitswelt. In: THIS, Nr. 2/2018, S, 116-123. Bauverlag, Gütersloh. ISSN nicht existent. URL: <https://www.this-magazin.de/> (19.03.2020).
- Sacos (2018). Full-Body Powered Exoskeleton XO des Unternehmens Sacros Robotics Corporation. URL: <https://www.sarcos.com/products/guardian-xo-powered-exoskeleton> (19.03.2020).
- Saidi, K. S., Bock, T. & Georgoulas, C. (2016). Robotics in Construction. In: Handbook of Robotics (Hrsg. B. Siciliano, O. Khatib), S. 1493-1520. Springer, Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-319-32550-7.
- Sakin, M. & Kiroglu, Y. C. (2017). 3D Printing of Buildings: Construction of the Sustainable Houses of the Future by BIM. In: Energy Procedia, Band 134, S. 702-711. Elsevier, Amsterdam. ISSN: 1876-6102. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.09.562.
- Salmi, T., Ahola, J. M., Heikkilä, T., Kilpeläinen, P. & Malm, T. (2018). Human-Robot Collaboration and Sensor-Based Robots in Industrial Applications and Construction. In: Robotic Building (Hrsg. H. Bier), S. 25-52. Springer, Cham. ISBN: 978-3-319-70865-2.
- Samulat, P. (2017). Die Digitalisierung der Welt. Springer Gabler, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-15510-0.

- Sander, D. (2018). Die Arbeitszeiten in der App. In: Computer Spezial, Nr. 2/2018, S. 34-35. ISSN nicht existent. URL: <https://www.computer-spezial.de/> (19.03.2020).
- Schach, R., Krause, M., Näther, M. & Nerela, V. N. (2017). CONPrint3d: Beton-3D-Druck als Ersatz für den Mauerwerksbau. In: Bauingenieur, Nr. 92, S. 355–363. VDI Fachmedien, Düsseldorf. ISSN: 0005-6650.
- Schaper, D. & Tulke, J. (2015). BIM bei HOCHTIEF Solutions. In: Building Information Modeling (Hrsg. A. Borrmann, M. König, C. Koch, J. Beetz), S. 425–438. Springer, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-05605-6.
- Schapke, S.-E., Beetz, J., König, M., Koch, C. & Borrmann, A. (2015). Kooperative Datenverwaltung. In: Building Information Modeling (Hrsg. A. Borrmann, M. König, C. Koch, J. Beetz), S. 207–236. Vieweg + Teubner, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-05605-6.
- Scharfenberg, P. & Wellensieck, T. (2017). BIM-Bauvertrag. In: BIM-Ratgeber für Bauunternehmer (Hrsg. K. Silbe, J. Díaz), S. 117–129. Rudolf Müller, Köln. ISBN: 978-3-481-03566-2.
- Scharnhorst, U. & Kaiser, H. (2010). Transversale Kompetenzen für eine ungewisse digitale Zukunft. In: Digitalisierung und Berufsbildung, S. 9-12. URL: <https://www.ehb.swiss/file/9562/download> (19.03.2020).
- Scheer, A.-W. & Wachter, C. (2018). Digitale Bildungslandschaften. In: Digitalisierung und Bildung (Hrsg. S. Ladel, J. Knopf, A. Weinberger), S. 81-88. Springer, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-18332-5.
- Schermelleh-Engel, K. & Werner, C. S. (2012). Methoden der Reliabilitätsbestimmung. In: Testtheorie und Fragebogenkonstruktion (Hrsg. H. Moosbrugger, A. Kelava), S. 119-141. Springer, Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-642-20071-7.
- Scheuch, H. (2018). Wienerberger erforscht mit Fastbrick die Zukunft des Bauens – Internetseite des Unternehmens Wienerberger AG. URL: <https://wienerberger.com/de/news/wienerberger-erforscht-mit-fastbrick-die-zukunft-des-bauens> (19.03.2020).
- Schäfer, C. (2012). Einsatzmodell zur systematischen Nutzung von Virtueller Realität in der Unikatproduktion (Dissertation an der Technischen Universität Hamburg).
- Schilcher, C. & Diekmann, J. (2014). Moderne Arbeitswelten. Springer, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-06789-2. DOI: 10.1007/978-3-658-06790-8.
- Schlick, C., Bruder, R. & Luczak, H. (2018). Arbeitswissenschaft (4. Aufl.). Springer Vieweg, Berlin. ISBN: 978-3-662-56036-5.
- Schönbeck, M. A. (2016). Systemisches Denken in technischen Berufen. Das Beispiel Bautechnik. In: Die Vielfalt der Wege zu technischer Bildung (Hrsg. G. Kammasch, H. Klaffke, S. Knutzen), S. 282–287. UniPrint, Siegen. ISBN: 978-3-9818728-0-4.

- Schneider, C. & Malkwitz, A. (2017). Anwendung von Building Information Modeling im Bauhandwerk. URL: <https://www.ikz.de/fachwissen/ish/news/detail/bim-im-handwerk/> (20.03.2020).
- Schneider, O. & Günthner, W. A. (2009). RFID-Einsatz in der Baubranche. URL: http://mediatum.ub.tum.de/doc/1187951/fml_20131230_142_export.pdf (20.03.2020).
- Schork, F., Zillmann, M., Michel, J., Dengler, K. & Buch, T. (2017). Digitalisierung der Arbeitswelt – Folgen für den Arbeitsmarkt in Sachsen. In: IAB-Regional, Nr. 1. IAB, Nürnberg. URL: <https://www.iab.de/244/section.aspx/Publikation/k170329303> (20.03.2020).
- Schorr, M. & Klaubert, C. (2011). Bauausführung. In: Digitale Baustelle – innovativer Planen, effizienter Ausführen (Hrsg. W. Günthner, A. Borrmann), S. 145-150. Springer, Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-642-16485-9.
- Schreyer, M. (2016). BIM – Einstieg kompakt für Bauunternehmer (Hrsg. J. Przybylo). Beuth, Berlin. ISBN: 978-3-410-25702-8.
- Schulz, M. (2015). Warum wir jetzt kämpfen müssen. In: Technologischer Totalitarismus (Hrsg. F. Schirmacher). Suhrkamp, Berlin. ISBN: 978-3-518-07434-3.
- Schwerdtner, P. (2018). Nutzung von BIM in der Angebotsbearbeitung. Eine Sollbruchstelle in der digitalen Prozesskette? In: Bautechnik, Band 95, S. 1-7. Ernst & Sohn, Berlin. ISSN: 0932-8351.
- Sharif, T. (2015). The Leica Geosystems BIM Field Trip. In: BIM Today Nr. 1, S. 54-55. ISSN: 2058-9611. URL: <https://www.pbctoday.co.uk/news/publications/bim-today/bim-today-february-2015/14361/> (20.03.2020).
- Siciliano, B. & Khatib, O. (2016). Handbook of Robotics (2. Aufl.). Springer, Berlin Heidelberg New York. ISBN: 978-3-319-32550-7.
- Silbe, K. (2017). Einführung von BIM in Deutschland. In: BIM-Ratgeber für Bauunternehmer (Hrsg. K. Silbe, J. Díaz). S. 11-20. Rudolf Müller, Köln. ISBN: 978-3-481-03566-2.
- Site Diary (2018). Construction Site Diary App and Site Management Software – Internetseite des Unternehmens Script and Go. URL: <https://sitediary.com/> (20.03.2020).
- Softbank Robotics (2019). Vorstellung der Roboter Pepper und Nao – Internetseite des Unternehmens SoftBank Robotics. URL: <https://www.softbankrobotics.com/emea/en> (20.03.2020).
- Sommer, S. (2019). In vier Schritten zum automatisierten Handwerksbetrieb. Internetseite Handwerk Magazin. URL: <https://www.handwerk-magazin.de/in-vier-schritten-zum-automatisierten-handwerksbetrieb/150/30176/381800> (20.03.2020).

- Son, H., Choi, H., Seong, H. & Kim, C. (2019). Detection of construction workers under varying poses and changing background in image sequences via very deep residual networks. In: Automation in Construction, Nr. 99, S. 27-38. Elsevier, Amsterdam. ISSN: 0926-5805. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.11.033.
- Sonntag, K., Frieling, E. & Stegmaier, R. (2012). Lehrbuch Arbeitspsychologie. Hans Huber, Bern. ISBN: 978-3-456-85002-3.
- Specht, P. (2018). Die 50 wichtigsten Themen der Digitalisierung (1. Aufl.). Redline Verlag, Münschen. ISBN: 978-3-868-81705-8.
- Spöttl, G. (2016). Prozessorientierung. In: Lexikon Berufsbildung (Hrsg. J.-P. Pahl), S. 750-751. Bertelsmann, Bielefeld. ISBN: 978-3-7639-5683-8.
- Spöttl, G. & Windelband, L. (2013). Berufswissenschaftliche Forschung und Methoden. In: Handbuch Berufsforschung (Hrsg. J. P. Pahl, V. Herkner), S. 186-196. Bertelsmann, Bielefeld. ISBN: 978-3-7639-5094-2.
- Staub, M. (2012). Ein Alleskönner erobert den Bau (RFID). In: Baublatt, Nr. 16, S. 26-29. ISSN: 1660-4504. URL: <https://www.baublatt.ch/praxis/ein-alleskoenner-erobert-den-bau> (20.03.2020).
- Stein, P. (2014). Forschungsdesigns für die quantitative Sozialforschung. In: Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung (Hrsg. N. Baur, J. Blasius), S. 131-151. Springer, Wiesbaden. ISBN: 978-3-531-17809-7.
- Structure (2018). Structure 3D-Scanning – Internetseite des Unternehmens Occipital. URL: <https://structure.io/> (20.03.2020).
- Strunge, J. (2018). Materialentwicklung für die Herstellung von Betonbauteilen im 3D-Druck. In: beton, Nr. 3/2018, S. 84-85. Bau + Technik, Erkrath. ISSN nicht existent. URL: <https://www.verlagbt.de/verlag/beton/> (20.03.2020).
- Syben, G. (2010). Qualität und Kompetenz als Leitbilder der Bauwirtschaft. In: Die Vision einer lernenden Branche im Leitbild Bauwirtschaft, S. 17-38. Edition Sigma, Berlin. ISBN: 978-3-8360-3574-3.
- Syben, G. (2012). Berufliche Tätigkeit, Kompetenzprofil und Bildungsbedarf von Bautechnikern und Bautechnikerinnen – eine explorative Untersuchung. URL: www.baq-bremen.de/images/stories/pdf/BAQ-Bautechniker-Abschlussbericht-23-04-2012.pdf (20.03.2020).
- Syben, G. (2014). Bauleitung im Wandel – Arbeit als Bewältigung von Kontingenz (Hrsg. Hans-Böckler-Stiftung). Edition Sigma, Berlin. ISBN: 978-3-8360-8763-6.
- Syben, G. (2017). Formen und Folgen von BIM für die Arbeit in Bauunternehmen. In: BAG-Report, Nr. 1/2017, S. 20–25. ISSN nicht existent. URL: <https://bag-bau-holzfarbe.de/schlagwort/2017/> (20.03.2020).

- Syben, G. (2018). Arbeit 4.0 in Bauunternehmen. Hans Böckler-Stiftung, Düsseldorf. ISSN: 2509-2359. URL: www.boeckler.de/pdf/p_fofoe_WP_106_2018.pdf (20.03.2020).
- Tautschnig, A., Froch, G., Mosl, M. & Gachter, W. (2017). Building Information Modeling – Überblick über Technologie und Arbeitsmethodik mit Praxisbeispielen. In: Betonkalender 2018 (Hrsg. K. Bergmeister, F. Fingerloos, J.-D. Wörner), S. 357-413. Ernst & Sohn, Berlin. ISBN: 978-3-433-03160-5.
- Tiemann, M., Schade, H.-J., Helmrich, R., Hall, A., Braun, U. & Bott, P. (2008). Berufsfeld-Definitionen des BIBB, Heft 105. BiBB, Bonn. ISBN: 978-3-88555-844-6. URL: <https://www.bibb.de/veroeffentlichungen/de/publication/show/2080> (20.03.2020).
- Trede, I. & Lüthi, I. (2018). Wie können Berufsbildungsverordnungen aktuell bleiben? S. 13-17. URL: <https://www.ehb.swiss/file/9562/download> (20.03.2020).
- Trimble (2018). 3D-Scanner TX8 – Internetseite des Unternehmens Trimble. URL: <https://de.geospatial.trimble.com/products-and-solutions/trimble-tx8> (20.03.2020).
- TUE (2019). Digital Concrete 2020 – 3D Concrete Printing (Hrsg. TU Eindhoven). URL: <https://www.tue.nl/en/research/research-groups/structural-engineering-and-design/concrete-research-areas/3d-concrete-printing/> (20.03.2020).
- Tulke, J. & Schaper, D. (2015). BIM-gestützte Produktionssysteme. In: Building Information Modeling (Hrsg. A. Borrmann, M. König, C. Koch, J. Beetz). Springer Vieweg, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-05605-6.
- TUM (2017). Beton aus dem 3D-Drucker – Internetseite der Technischen Universität München (TUM). URL: <https://www.tum.de/die-tum/aktuelles/pressemitteilungen/detail/article/34334/> (20.03.2020).
- Tybot (2018). The Autonomous Rebar Tying Robot – Internetpräsenz des Unternehmens Tybot LLC. URL: <https://www.tybotllc.com/> (20.03.2020).
- Unipor (2018). Mauerziegel aus dem Drucker – Internetseite des Unternehmens Unipor. URL: <https://www.unipor.de/presse/mauerziegel-aus-dem-drucker> (20.03.2020).
- van Renssen, L., Liecke, M., Sobania, K. & Schlotböller, D. (2016). Wirtschaft digital: Perspektiven erkannt, erste Schritte getan. (Hrsg. DIHK). ISSN: 1863-883X. URL: <https://www.dihk.de/resource/blob/4382/ec1ad2449a3efdbda89e9c3b051c77d0/wirtschaft-digital-perspektiven-erkannt-erste-schritte-getan-data.pdf> (20.03.2020).
- van Sante, M. (2019). ConTech: Technology in Construction – Construction sector digitalising but showing little industrialisation. URL: <https://www.ing.nl/zakelijk/kennis-over-de-economie/uw-sector/Building-and-Construction/european-builders-frontrunners-in-robotisation.html> (20.03.2020).

- Varjo (2019). VR-Lösungen auf der Internetseite des Unternehmens Varjo. URL: <https://varjo.com/for-aec/> (20.03.2020).
- VDA (2015). Automatisierung – Von Fahrerassistenzsystemen zum automatisierten Fahren (Hrsg. Verband der Automobilindustrie – VDA). URL: <https://www.vda.de/de/services/Publicationen/automatisierung> (20.03.2020).
- VDI (2017). Building Information Modeling – VDI-Richtlinie zur Zielerreichung (Hrsg. Verein Deutscher Ingenieure; 4. Aufl.). URL: <https://docplayer.org/55420335-Building-information-modeling-vdi-richtlinien-zur-zielerreichung.html> (20.03.2020).
- VDI 2552-11 (2019). VDI-Richtlinie Building Information Modeling 2552, Blatt 11.3 (Entwurf) – Informationsaustauschanforderungen – Schalungs- und Gerüsttechnik – Ortbetonbauweise. August 2019 (Hrsg. Verein Deutscher Ingenieure). Beuth, Berlin. URL: <https://www.vdi.de/richtlinien> (20.03.2020).
- VDI 2552-2 (2018). Building Information Modeling – Begriffe. Richtlinien-Reihe: 2552-2. Juni 2018 (Hrsg. Verein Deutscher Ingenieure). Beuth, Berlin. URL: <https://www.vdi.de/richtlinien> (20.03.2020).
- VDI 2552-7 (2018). VDI-Richtlinie Building Information Modeling 2552 Blatt 7 (Entwurf) – Prozesse. Oktober 2018 (Hrsg. Verein Deutscher Ingenieure). Beuth, Berlin. URL: <https://www.vdi.de/richtlinien> (20.03.2020).
- VDI 2552-8 (2019). VDI-Richtlinie Building Information Modeling 2552 Blatt 8.1 (Entwurf) – Qualifikationsanforderungen. Januar 2019 (Hrsg. Verein Deutscher Ingenieure). Beuth, Berlin. URL: <https://www.vdi.de/richtlinien> (20.03.2020).
- VDI 3780 (2000). VDI-Richtlinie: Technikbewertung – Begriffe und Grundlagen. September 2000 (Hrsg. Verein Deutscher Ingenieure). <https://www.vdi.de/richtlinien> (20.03.2020).
- VDMA (2016). Industrie 4.0 – Qualifizierung 2025 (Hrsg. VDMA, Frankfurt). URL: <https://www.vdma.org/v2viewer/-/v2article/render/13668437> (20.03.2020).
- Vermehr, B. (2016). Ausbildungsordnung. In: Lexikon Berufsbildung (Hrsg. J.-P. Pahl), S. 91-92. wbv, Bielefeld. ISBN: 978-3-7639-5683-8.
- Visbox (2016). Viscube auf der Internetseite des Unternehmens Visbox. URL: <http://www.visbox.com/products/cave/viscube-m4/> (20.03.2020).
- Viscan (2019). Digitale Vermessungslösungen auf der Internetseite des Unternehmens Viscan. URL: <https://viscan.de/> (20.03.2020).
- Vogler-Ludwig, K., Düll, N., Kriechel, B. & Vetter, T. (2016). Arbeitsmarkt 2030 – Wirtschaft und Arbeitsmarkt im digitalen Zeitalter. Bertelsmann, Bielefeld. URL: <https://doi.org/10.3278/6004556w> (20.03.2020).

- von der Heyde, C. (2014). Allgemeine Theorie von Random-Stichproben. In: Stichprobenverfahren in der Umfrageforschung (Hrsg: ADM Arbeitskreis Deutscher Markt- und Sozialforschungsinstitute e. V.), S. 25-36. Springer, Wiesbaden. ISBN: 978-3-531-16445-8.
- Wagner, P. & Hering, L. (2014). Online-Befragung. In: Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung (Hrsg. N. Baur, J. Blasius), S. 661-673. Springer, Wiesbaden. ISBN: 978-3-531-17809-7.
- WakeCap (2018). Digitale Baustellenlösungen auf der Internetseite des Unternehmens WakeCap. URL: <https://www.wakecap.com/> (20.03.2020).
- Wedel, F. & Marx, S. (2020). Prognose von Messdaten beim Bauwerksmonitoring mithilfe von Machine Learning. In: Bautechnik (97), S. 836–845. ISSN: 1437-0999. DOI: 10.1002/bate.202000073.
- Weichbold, M. (2014). Pretests. In: Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung (Hrsg. N. Baur, J. Blasius), S. 299-304. Springer, Wiesbaden. ISBN 978-3-531-17809-7.
- Wieckhorst, T. (2017). 3D-Druck mit Beton. In: Bauhandwerk, Nr. 12, S. 6-7. ISSN nicht existent. URL: <https://www.bauhandwerk.de/archiv.html> (20.03.2020).
- Wieckhorst, T. (2019). Exoskelette für Arbeiten über Kopf. In: Bauhandwerk, Nr. 4, S. 30-31. ISSN nicht existent. URL: https://www.bauhandwerk.de/ausgaben/bhw_2019-04_3337627.html (20.03.2020).
- Wiegerling (2015). Wissen. In: Lexikon Pädagogik (Hrsg. S. Jordan, M. Schlüter). Reclam, Stuttgart. ISBN: 978-3-150-19296-2.
- Wieselhuber (2018). BIM – are you ready? (Hrsg. Dr. Wieselhuber & Partner GmbH) URL: https://www.wieselhuber.de/publikationen/publikation/-/186/BIM_are_you_ready (20.03.2020).
- Willberg, U., Baumgärtel, T. & Klaubert, C. (2011). Von der Grundlagenermittlung bis zum Betrieb – Die Sicht des Bauherrn. In: Digitale Baustelle – innovativer Planen, effizienter Ausführen (Hrsg. W. Günthner, A. Borrmann), S. 8-11. Springer, Heidelberg. ISBN: 978-3-642-16485-9.
- Willmott Dixon (2018). Willmott Dixon trials high-tech robotic vest that could revolutionise construction. URL: <https://www.willmottdixon.co.uk/news/willmott-dixon-trials-high-tech-robotic-vest-that-could-revolutionise-construction> (20.03.2020).
- Windhagen, E., Bughin, J., Mischke, J., Baur, C., Mattern, F. & Forman, S. (2017). Das digitale Wirtschaftswunder – Wunsch oder Wirklichkeit (Hrsg. McKinsey Global Institute). URL: <https://www.mckinsey.de/publikationen/das-digitale-wirtschaftswunder-wunsch-oder-wirklichkeit> (20.03.2020).
- Winfield, A. (2012). Robotics – A very short Introduction. University Press, Oxford. ISBN: 978-0-19-969598-0.

- Winkelhake, U. (2017). Die digitale Transformation der Automobilindustrie – Treiber – Roadmap – Praxis. Springer Vieweg, Berlin. ISBN: 978-3-662-54934-6.
- Wischmann, S. & Hartmann, E. A. (2018). Zukunft der Arbeit. Springer, Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-662-49265-9.
- Wolf, S., Dollinger, C., Hees, A. & Reinhart, G. (2018). Der Mensch in Interaktion mit autonomen Planungs- und Steuerungssystemen für Cyberphysische Produktionssysteme, In: Zukunft der Arbeit – Eine praxisnahe Betrachtung (Hrsg. S. Wischmann, A. Hartmann), S. 123-132. Springer Vieweg, Berlin. ISBN: 978-3-662-49265-9.
- Wolfangel, E. (2017). Arbeiten in der virtuellen Realität. In: Technology Review, Januar, S. 26. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge. ISSN: 1613-0138. URL: <https://www.technologyreview.com/magazine/2020/03/#past-issues> (20.03.2020).
- Wolter, M. I., Mönning, A., Hummel, M., Schneemann, C., Weber, E., Zika, G., Helmrich, R., Maier, T. & Neuber-Pohl, C. (2015). Industrie 4.0 und die Folgen für Arbeitsmarkt und Wirtschaft. IAB, Nürnberg. ISSN: 2195-2655. URL: <https://www.iab.de/185/section.aspx/Publikation/k151019301> (20.03.2020).
- Wyrwal, M. & Zinn, B. (2017). Skalierung und theoretische Modellierung berufsfachlicher Kompetenz zum Ende der Fachschule Bautechnik. In: Trends beruflicher Arbeit – Digitalisierung, Nachhaltigkeit, Heterogenität (Hrsg. S. Baabe-Meijer, W. Kuhlmeier, J. Meyser), S. 58-85. PubliQation, Norderstedt. ISBN: 978-3-745-86977-4.
- XtreeE (2019). Large Scale 3D-Printing auf der Internetseite des Unternehmens XtreeE. URL: <https://www.xtreee.eu/> (20.03.2020).
- Xuehui, A., Li, Z., Zuguang, L., Chengzhi, W., Pengfei, L. & Zhiwei, L. (2021). Dataset and benchmark for detecting moving objects in construction sites. In: Automation in Construction (122), S. 1-18. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103482.
- Zeller, B., Richter, R. & Dauser, D. (2004). Kompetent für einfache Tätigkeiten? Der Wandel der Kompetenzanforderungen an „einfache Arbeit“. In: Soft Skills – Überfachliche Qualifikationen für betriebliche Arbeitsprozesse (Hrsg. H.-J. Bullinger, R. Mytzek, B. Zeller), S. 43-90. Bertelsmann, Bielefeld. ISBN: 3-7639-3234-8.
- Zhang, P., Li, N., Jiang, Z., Fang, D. & Anumba, C. J. (2019). An agent-based modeling approach for understanding the effect of worker-management interactions on construction workers' safety-related behaviors. In: Automation in Construction, Nr. 97, S. 29-43. ISSN: 0926-5805. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.10.015.
- Zhang, X., Li, M., Lim, J. H., Weng, Y., Tay, Y. W. D., Pham, H. & Pham, Q.-C. (2018). Large-scale 3D Printing by a Team of mobile Robots. In: Automation in Construction, Nr. 95, S. 98-106. ISSN: 0926-5805 DOI: 10.1016/j.autcon.2018.08.004.

- Zhou, Y., Guo, H., Ma, L., Zhang, Z. & Skitmore, M. (2021). Image-based onsite object recognition for automatic crane lifting tasks. In: *Automation in Construction* (123), S. 1-3. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103527.
- Zuboff, S. (2015). Der menschliche Faktor. In: *Technologischer Totalitarismus* (Hrsg. F. Schirmacher), S. 262-273. Suhrkamp, Berlin. ISBN: 978-3-518-07434-3.

Anhang

Der Anhang beinhaltet Metadaten, die in Bezug auf die Online-Umfrage relevant sind. Die nachfolgend aufgeführten Angaben dienen als Grundlage für die in der Dissertation aufgeführten Erkenntnisse.

Pretest der Online-Umfrage

Neben dem wissenschaftlichen Diskurs, der zur Erstellung des Fragebogens geführt hat, wurden – wie in Abschnitt 5.3 der Dissertation dargestellt – zwei Experten aus der Praxis für die Bewertung der Fragen herangezogen. Nachfolgend finden sich die Fragen wieder, die dem BIM-Manager und dem Polier zur Prüfung vorgelegt wurden. Bei dem BIM-Manager handelt es sich um einen Experten, der sich in einem großen deutschen Baukonzern mit Möglichkeiten der Digitalisierung im Bauwesen auseinandersetzt. Der befragte Polier konnte durch seine mehrjährige Erfahrung auf verschiedenen großen Baustellen die Fragen von Seiten der Bauausführung bewerten. Die von beiden Experten vorgenommenen Anmerkungen sind anschließend an die hier aufgeführten Fragen zu finden.

1. Welche Tätigkeiten werden von Ihrem Unternehmen ausgeführt?
(Mehrfachantworten sind möglich.)
 - Maurerarbeiten
 - Beton- und Stahlbetonarbeiten
 - Ausbauarbeiten
 - Renovierungsarbeiten
 - andere/weitere Tätigkeiten

2. Wie viele Beschäftigte arbeiten in Ihrem Unternehmen auf der Baustelle?
 - weniger als 5 Mitarbeiter
 - 5 bis 9 Mitarbeiter
 - 10 bis 19 Mitarbeiter

- 20 bis 49 Mitarbeiter
- mehr als 50 Mitarbeiter

3. In welchem Bereich arbeiten Sie im Unternehmen?

- Geschäftsführung
- Baufacharbeit (z. B. als Polier, Maurer oder Stahlbetonbauer)
- Planung (z. B. als Bauingenieur oder Architekt)
- Verwaltung (z. B. als Bürofachkraft oder im Sekretariat)
- in einem anderen Bereich

4. Wie werden bauwerksrelevante bzw. projektbezogene Informationen an die Baustelle vermittelt? (Mehrfachantworten sind möglich.)

- über ausgedruckte 2D-Pläne
- über Telefonate (auch Videotelefonie, z. B. Skype)
- über E-Mails
- über Cloud-Lösungen (Datentransfer über das Internet)
- über soziale Netzwerke/Nachrichtendienste (z. B. Facebook, WhatsApp, ...)
- über digitale 3D-Modelle (z. B. BIM-Modelle)
- andere/weitere Übergabeformen:

.....

5. Wie findet die Kommunikation mit anderen Projektbeteiligten (z. B. Architekten, Ingenieuren, Baustoffhändlern, ...) statt? (Mehrfachantworten sind möglich.)

- über Telefonate
- über E-Mails
- über soziale Netzwerke/Nachrichtendienste (z. B. Facebook, WhatsApp, ...)
- über Videokonferenzen
- über Cloud-Lösungen (Datentransfer über das Internet)
- über digitale 3D-Modelle (z. B. BIM-Modelle)
- andere/weitere Kommunikationsformen:

.....

6. Welche der nachfolgenden Geräte und Technologien nutzen Sie im Baustellenbetrieb? (Mehrfachantworten sind möglich.)

- Smartphone
- Tablet
- Fax
- Datenuhr (z. B. Smartwatches)
- Computer oder Laptop (z. B. im Bauwagen oder im Baucontainer)
- Laserdistanzmesser („Distos“)
- Cloud-Lösungen (z. B. für Datenspeicherungen im Internet)
- Geräte für die mobile Datenerfassung (z. B. Bestands-Scanner)
- Augmented Reality (z. B. mit Tablets oder Brillen)
- Laserscanner (z. B. für Bestandsaufnahmen)
- RFID-Transponder (z. B. zur Ortung von Bauteilen oder Werkzeugen)
- 3D-Drucker
- Bauroboter
- Drohnen
- weitere Geräte oder Technologien:

.....

7. Wie häufig nutzen Sie Apps und Funktionen Ihres Smartphones oder Tablets für baustellenbezogene Tätigkeiten (z. B. für Nachrichten, Notizen oder Fotoaufnahmen, ...)?

- mehrmals täglich
- mehrmals in der Woche
- nur sehr selten
- nie

8. Planen Sie größere Anschaffungen digitaler Arbeitsmittel (z. B. 3D-Drucker, Laserscanner, RFID-Systeme, ...)?

- ja, kurzfristig (in 1 bis 2 Jahren)
- ja, aber eher mittelfristig (in 2 bis 5 Jahren)
- ja, aber eher langfristig (in etwa 5 Jahren oder später)
- nein, gar nicht

9. Sollten Sie Anmerkungen oder Ergänzungen zur Umfrage haben, können Sie diese gerne in diesem Fenster vornehmen:

Vielen Dank für Ihre Teilnahme!

Anmerkungen zum Pretest

Anmerkungen des BIM-Managers vom 23.09.2019:

Ich finde alles soweit verständlich und logisch. Ich hatte mir zu den einzelnen Fragen folgende Punkte notiert:

zu Frage 1, Zuordnung des Tätigkeitsfeldes:

„Generalunternehmer“ und evtl. „Planer“ sollte mit aufgenommen werden

zu Frage 4, Informationsübergabe:

unter “über Cloud-Lösungen“ kann man noch Planserver als Beispiel anführen (z.B. Planserver, Dropbox, Google Drive, We transfer,...)

“über digitale Pläne (z.B. PDF, DWG,...)“ sollte mit aufgenommen werden

zu Frage 5, Kommunikation:

unter “über Cloud-Lösungen“ kann man noch Planserver als Beispiel anführen (z.B. Planserver, Dropbox, Google Drive, We transfer,...)

“über digitale Pläne (z.B. PDF, DWG,...)“ sollte mit aufgenommen werden

Frage 8, Anschaffung digitaler Arbeitsmittel:

Planen Sie oder Ihre Firma größere Anschaffungen...

Bei Frage 4+5 kann man noch deutlicher nach der eigenen Anwendung und Erfahrung fragen, z. B.

“Wie vermitteln Sie bauwerksrelevante bzw. projektbezogene Informationen an die Baustelle?“

“Wie findet Ihre Kommunikation mit anderen Projektbeteiligten (...) statt?“

Oder ist das so gewollt und hier soll die Anwendung im Projekt (u. U. nicht durch einen selbst) abgefragt werden?

Anmerkungen des Poliers vom 27.09.2019:

Der Aufbau der Umfrage ist selbst erklärend, die genannte Arbeitsmittel kommen so auch zum Einsatz auf den Baustellen, wo ich tätig bin. Ich kann dazu nur sagen tolle Onlineumfrage. Wenn mir noch neue Ideen kommen melde ich mich.

Anpassungen der Online-Umfrage:

Von den hier aufgeführten Anmerkungen sind die Ergänzungen zu den Beispielen der Cloud-Lösungen in die endgültige Umfrage zusätzlich eingebunden worden.

Fragebogen der Online-Umfrage

Die nachfolgenden Fragen wurden in der Online-Umfrage an die Bauunternehmen versendet. Sie werden hier als Screenshots aus dem Programm LimeSurvey dargestellt.

Welche Arbeiten werden von Ihrem Unternehmen hauptsächlich ausgeführt?

- Rohbauarbeiten
- Ausbauarbeiten
- Renovierungsarbeiten
- andere Arbeiten

Abb. A-1: Frage 1 der Online-Umfrage (Fragenblock I: Zuordnung)

Wie viele Beschäftigte arbeiten in Ihrem Unternehmen auf der Baustelle?

- weniger als 5 Mitarbeiter
- 5 bis 9 Mitarbeiter
- 10 bis 19 Mitarbeiter
- 20 bis 49 Mitarbeiter
- mehr als 50 Mitarbeiter

Abb. A-2: Frage 2 der Online-Umfrage (Fragenblock I: Zuordnung)

In welchem Bereich arbeiten Sie in Ihrem Unternehmen?

- Geschäftsführung
- Baufacharbeit (z. B. als Polier, Maurer oder Stahlbetonbauer)
- Planung (z. B. als Bauingenieur oder Architekt)
- Verwaltung (z. B. als Bürofachkraft oder im Sekretariat)
- anderer Bereich

Abb. A-3: Frage 3 der Online-Umfrage (Fragenblock I: Zuordnung)

Wie werden bauwerksrelevante bzw. projektbezogene Informationen an die Baustelle vermittelt?
(Mehrfachantworten sind möglich.)

- über ausgedruckte 2D-Pläne
- über Telefonate
- über E-Mails
- über digitale Dokumente (z. B. PDF-, Word- oder Zeichnungsdateien)
- über Videotelefonie (z. B. Skype, Zoom, Facetime, ...)
- über Cloud-Lösungen (z. B. Dropbox, WeTransfer, Google Drive ...)
- über soziale Netzwerke bzw. Nachrichtendienste (z. B. Facebook, WhatsApp, Mattermost ...)
- über digitale 3D-Modelle (z. B. BIM-Modelle)
- weitere Informationsübermittlungen

Abb. A-4: Frage 4 der Online-Umfrage (Fragenblock II: Kommunikation)

Wie findet die Kommunikation mit anderen Projektbeteiligten (z. B. Architekten, Ingenieuren, Baustoffhändlern, ...) statt?
(Mehrfachantworten sind möglich.)

- über Telefonate
- über E-Mails
- über digitale Dokumente (z. B. PDF-, Word- oder Zeichnungsdateien)
- über soziale Netzwerke bzw. Nachrichtendienste (z. B. Facebook, WhatsApp, Mattermost, ...)
- über Videokonferenzen (z. B. Skype, Zoom, Facetime, ...)
- über Cloud-Lösungen (z. B. Dropbox, WeTransfer, Google Drive, ...)
- über digitale 3D-Modelle (z. B. BIM-Modelle)
- weitere Kommunikationsformen

Abb. A-5: Frage 5 der Online-Umfrage (Fragenblock II: Kommunikation)

Welche der nachfolgenden Geräte und Technologien verwenden Sie im Baustellenbetrieb?
(Mehrfachantworten sind möglich.)

- Smartphones
- Tablets
- Fax
- Datenuhren (z. B. Smartwatches)
- Computer bzw. Laptops (z. B. im Bauwagen)
- Laserdistanzmesser („Distos“)
- Cloud-Lösungen (z. B. Dropbox, WeTransfer, Google Drive, ...)
- Laserscanner
- Augmented Reality (z. B. mit Tablets oder Brillen)
- RFID-Transponder (z. B. zur Ortung von Bauteilen oder Werkzeugen)
- 3D-Drucker
- Bauroboter
- Drohnen
- weitere Geräte oder Technologien

Abb. A-6: Frage 6 der Online-Umfrage (Fragenblock III: Verwendung)

Wie häufig nutzen Sie Apps bzw. Funktionen Ihres Smartphones oder Tablets für baustellenbezogene Tätigkeiten (z. B. für Telefonate, Nachrichten, Notizen Fotoaufnahmen, ...)?

- mehrmals täglich
- mehrmals in der Woche
- nur sehr selten
- nie

Abb. A-7: Frage 7 der Online-Umfrage (Fragenblock IV: Prognose)

Plant Ihr Unternehmen größere Anschaffungen digitaler Arbeitsmittel (z. B. 3D-Drucker, Laserscanner, RFID-Systeme, ...)

- ja, kurzfristig (in 1 bis 2 Jahren)
- ja, aber eher mittelfristig (in 2 bis 5 Jahren)
- ja, aber eher langfristig (in etwa 5 Jahren oder später)
- nein, gar nicht

Abb. A-8: Frage 8 der Online-Umfrage (Fragenblock IV: Prognose)

Ablauf der Handwerker-Suche und Angaben zur telefonischen Kontaktaufnahme

Bei der Suche nach Unternehmen wurden insbesondere Handwerksbetriebe des Massiv- bzw. Rohbaus gewählt. Die Adressen wurden alle mithilfe der Handwerker-Suche der einzelnen Handwerkskammern ausfindig gemacht. Wenn kein reines Versenden des Online-Links per E-Mail stattgefunden hat, sind Unternehmen stellenweise zuvor telefonisch kontaktiert worden. Die Telefonate wurden i. d. R. zwischen 9:00 und 11:30 Uhr und zwischen 13:00 und 16:00 Uhr geführt. Bei Interesse auf Seiten der Betriebe wurde eine leicht angepasste E-Mail mit dem jeweiligen Ansprechpartner versendet. Auch wenn aus Datenschutzgründen nicht kontrolliert werden kann, welche Unternehmen letztendlich an der Umfrage teilgenommen haben, so ist dennoch davon auszugehen, dass sich verstärkt die Betriebe, die zuvor telefonisch kontaktiert wurden, an der Umfrage beteiligt haben.

Anschreiben zur Online-Umfrage

Betreffzeile: **Digitalisierung und Kommunikation im Bauhandwerk**

Sehr geehrte Damen und Herren,¹

wie entwickelt sich das Bauhandwerk im Rahmen der Digitalisierung und wo steht Ihr Unternehmen innerhalb der damit verbundenen Veränderungen?

Die immer häufiger eingesetzten digitalen Arbeitsmittel – von Smartphones bis hin zu Baurobotern – verändern zukünftig viele Baustellenarbeitsprozesse. Da insbesondere die kleinen und mittelständigen Bauunternehmen einen Großteil der Betriebe in Deutschland ausmachen, ist es überaus wichtig, genau diese in weitere Konzepte mit einzubeziehen.

Diesbezüglich findet eine Online-Umfrage an der Technischen Universität Hamburg (TUHH) statt, bei der wir Sie gerne berücksichtigen möchten. Wir würden uns daher sehr freuen, wenn Sie an der Umfrage, die sie über die folgende Verlinkung erreichen, teilnehmen:

URL-Link zur Online-Umfrage

Die Umfrage dauert weniger als vier Minuten.

Alle Angaben werden selbstverständlich anonym erfasst, so dass keine Rückschlüsse auf Sie oder Ihr Unternehmen gezogen werden können.

Wenn Sie Fragen haben oder Interesse an den Ergebnissen besteht, schreiben Sie gerne eine E-Mail an Dipl.-Ing. Thomas Kölzer (thomas.koelzer@tuhh.de).

Mit freundlichen Grüßen
Dipl.-Ing. Thomas Kölzer

Technische Universität Hamburg
Institut für Baustoffe, Bauphysik und Bauchemie
Eißendorfer Straße 42
21073 Hamburg
Telefon: 040 / 42878 - 4038
E-Mail: thomas.koelzer@tuhh.de

¹Je nach Möglichkeit wurden hier die Teilnehmerinnen und Teilnehmer persönlich mit Namen angesprochen.

Zusammenfassung zu den kontaktierten Bauunternehmen

Tab. A-1 listet auf, wie viele Bauunternehmen zu welchen Tagen zwischen dem 3. August 2020 und dem 27. August 2020 kontaktiert wurden.

Tab. A-1: Zusammenfassung zur Kontaktaufnahme mit kleinen und mittelständigen Bauunternehmen

Datum	nur E-Mail	Anruf und E-Mail	nur Anruf	Σ
03.08.2020	101	0	0	101
04.08.2020	22	0	0	22
05.08.2020	3	11	2	16
06.08.2020	20	14	0	34
07.08.2020	8	10	3	21
10.08.2020	2	8	0	10
11.08.2020	2	2	0	4
12.08.2020	4	6	3	13
13.08.2020	1	4	1	6
14.08.2020	1	1	1	3
19.08.2020	8	4	1	13
20.08.2020	26	1	6	33
25.08.2020	0	4	4	8
27.08.2020	0	3	12	15
Σ	198	68	33	299

Insgesamt wurden 299 Betriebe angeschrieben. Die erste Spalte listet die Tage auf, an denen die jeweiligen Unternehmen kontaktiert wurden. In der zweiten Spalte sind die Baufirmen dargestellt, die lediglich per E-Mail angeschrieben wurden. Danach folgen die Betriebe, die zuerst telefonisch angerufen wurden und daraufhin eine E-Mail mit dem Link erhalten haben. In der vorletzten Spalte sind die Bauunternehmen aufgeführt, die während des Telefonates bereits kein Interesse gezeigt haben. Betriebe, die erst gar nicht ans Telefon gegangen sind, sind in Tab. A-1 nicht aufgeführt. In der letzten Spalte sind die jeweiligen Summen der Kontakte pro Tag aufgeführt. Die unterste Zeile beinhaltet zusammengefasst jeweils die Summe der drei Kategorien.

Daten zur Online-Umfrage

Tabelle A-2 und A-3 zeigen alle Antworten der Online-Umfrage.

Tab. A-2: Zusammenfassung der Antworten der Online-Umfrage (Block I und II)

Fragenblock I: Zuordnung			Fragenblock II: Kommunikation															
Nr.	Arbeiten	Anzahl	Bereich	Pläne	Tel.	Mail	Docs	Video	Cloud	Nets	BIM	Tel.	Mail	Docs	Nets	Video	Cloud	BIM
1	Sonst.	10 bis 19	Verwaltung	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja	Nein	Ja	Ja	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein
2	Sonst.	20 bis 49	Facharbeit	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein
3	Sonst.	5 bis 9	Geschäfts.	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
4	Rohbau	20 bis 49	Verwaltung	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein
5	Ausbau	< 5	Geschäfts.	Ja	Nein	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein
6	Ausbau	10 bis 19	Geschäfts.	Ja	Nein	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein
7	Renov.	5 bis 9	Verwaltung	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein
8	Rohbau	5 bis 9	Geschäfts.	Nein	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein
9	Sonst.	< 5	Geschäfts.	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein
10	Rohbau	5 bis 9	Geschäfts.	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja	Nein
11	Rohbau	5 bis 9	Geschäfts.	Ja	Ja	Nein	Ja	Nein	Nein	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein
12	Sonst.	> 50	Verwaltung	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	Nein	Ja	Nein	Ja	Ja	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein
13	Renov.	10 bis 19	Geschäfts.	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja	Nein
14	Rohbau	20 bis 49	Geschäfts.	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja	Nein
15	Ausbau	10 bis 19	Geschäfts.	Nein	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
16	Rohbau	20 bis 49	Verwaltung	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja	Nein
17	Ausbau	< 5	Geschäfts.	Nein	Nein	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein
18	Ausbau	10 bis 19	Geschäfts.	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja	Nein
19	Rohbau	20 bis 49	Verwaltung	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein
20	Rohbau	5 bis 9	Verwaltung	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein
21	Renov.	< 5	Geschäfts.	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	Nein	Ja	Nein	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja	Nein	Nein
22	Rohbau	> 50	Verwaltung	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja	Nein	Nein
23	Ausbau	10 bis 19	Geschäfts.	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja	Nein	Nein
24	Ausbau	10 bis 19	Verwaltung	Ja	Nein	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein
25	Sonst.	> 50	Geschäfts.	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja	Ja	Nein
26	Renov.	< 5	Verwaltung	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
27	Renov.	10 bis 19	Verwaltung	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein
				16	19	18	19	3	4	10	0	26	27	21	6	4	6	0
				59%	70%	67%	70%	11%	15%	37%	0%	96%	100%	78%	22%	15%	22%	0%

Tab. A-3: Zusammenfassung der Antworten der Online-Umfrage (Block III und IV)

Nr.	Fragenblock III: Verwendung													Fragenblock IV: Prognose		
	Phone	Tablet	Fax	Uhren	PCs	Disto	Cloud	Laser	AR	RFID	3D	Robot	Drone	Nutzung	Anschaffungen	
1	Ja	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	mehrmals täglich	mittelfristig	
2	Ja	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	mehrmals täglich	nein	
3	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	nur sehr selten	nein	
4	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja	Ja	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	mehrmals täglich	nein	
5	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	mehrmals täglich	nein	
6	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	mehrmals täglich	mittelfristig	
7	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	mehrmals täglich	nein	
8	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	nur sehr selten	mittelfristig	
9	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	mehrmals täglich	nein	
10	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	nur sehr selten	mittelfristig	
11	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	mehrmals täglich	langfristig	
12	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	mehrmals täglich	mittelfristig	
13	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	mehrmals täglich	mittelfristig	
14	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	mehrmals täglich	langfristig	
15	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	mehrmals täglich	nein, gar nicht	
16	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	nur sehr selten	nein, gar nicht	
17	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja	Nein	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	mehrmals täglich	langfristig	
18	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	mehrmals täglich	mittelfristig	
19	Ja	Nein	Ja	Nein	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	mehrmals täglich	langfristig	
20	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	nur sehr selten	nein	
21	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	mehrmals täglich	nein	
22	Ja	Nein	Ja	Nein	Ja	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	mehrmals täglich	nein	
23	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja	Ja	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	mehrmals täglich	mittelfristig	
24	Ja	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	mehrmals in der Woche	mittelfristig	
25	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	mehrmals täglich	langfristig	
26	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	mehrmals täglich	nein	
27	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	mehrmals täglich	kurzfristig	
26	26	13	8	0	13	20	4	4	0	1	0	0	2			
96%	48%	30%	0%	0%	48%	74%	15%	15%	0%	4%	0%	0%	7%			

Zusätzliche Angaben zur Informatisierung

Abb. A-9 stellt die Auswertung der Informatisierungsprozesse nach Unternehmensgrößen dar. Da die Aufteilung keinen Mehrwert liefert, kann sie – ergänzend zu den Angaben in Abschnitt 5.4 der Dissertation – als rein informativ angesehen werden.

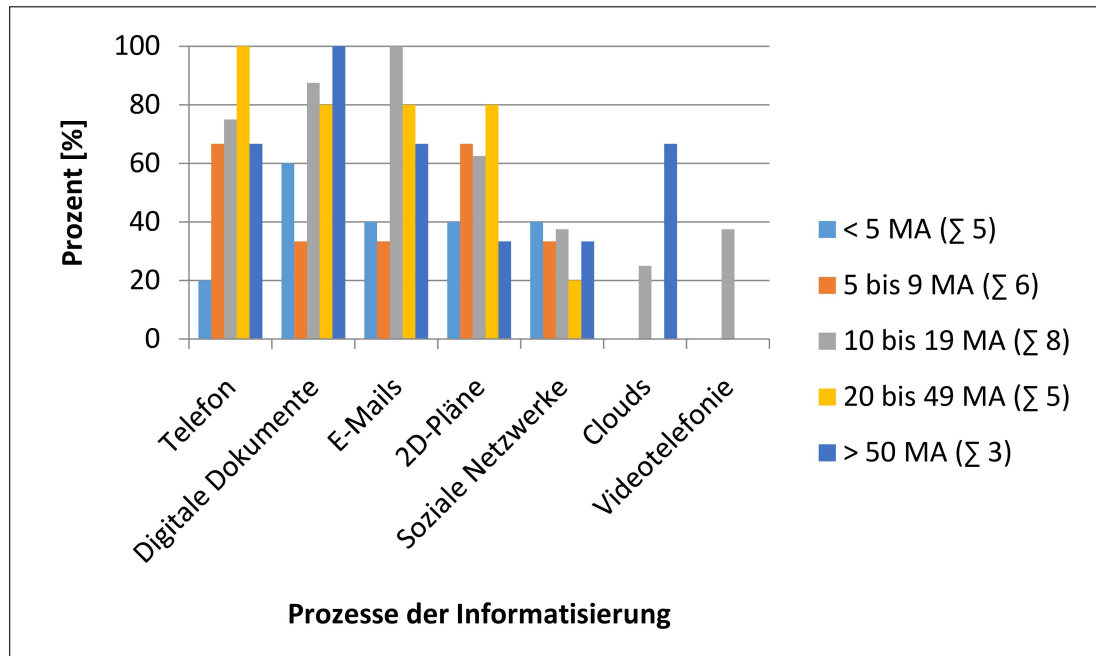


Abb. A-9: Prozesse der Informatisierung unterteilt nach Betriebsgrößen