

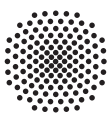
Beiträge zum Stuttgarter Maschinenbau

René Hellmuth

# Methodik zur Unterstützung der Fabrikumbau- planung unter Verwendung eines aktualisierten digitalen Fabrikgebäudemodells



stuttgarter  
**maschinenbau**  
interdisziplinär und vielfältig



**Universität Stuttgart**

Institut für Arbeitswissenschaft und  
Technologiemanagement IAT



Universität Stuttgart



**Beiträge zum Stuttgarter Maschinenbau**

**Band 23**

Herausgeber: Prof. Dr. Katharina Hölzle, MBA  
Prof. Dr.-Ing. Oliver Riedel

René Hellmuth

**Methodik zur Unterstützung der Fabrikumbau-  
planung unter Verwendung eines aktualisierten  
digitalen Fabrikgebäudemodells**

Fraunhofer Verlag

**Kontaktadresse:**

Institut für Arbeitswissenschaft und  
Technologiemanagement (IAT)  
Nobelstraße 12  
70569 Stuttgart  
info@iat.uni-stuttgart.de  
<https://www.iat.uni-stuttgart.de/>

Titelbild: © René Hellmuth

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der  
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im  
Internet über <http://dnb.de> abrufbar.

ISSN: 2750-655X

ISBN: 978-3-8396-1983-4

D 93

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2023

Druck und Weiterverarbeitung: Fraunhofer-Druckerei, Stuttgart

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

**© Fraunhofer Verlag, 2023**

Nobelstraße 12  
70569 Stuttgart  
verlag@fraunhofer.de  
[www.verlag.fraunhofer.de](http://www.verlag.fraunhofer.de)

als rechtlich nicht selbständige Einheit der

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung  
der angewandten Forschung e.V.  
Hansastraße 27 c  
80686 München  
[www.fraunhofer.de](http://www.fraunhofer.de)

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

## Geleitwort

Die deutsche Wirtschaft ist weltweit bekannt für ihren Anlagen- und Maschinenbau. Dabei ist die Universität Stuttgart mit ihren beiden Maschinenbau fakultäten – unter deren Dach sich 42 Institute befinden – die größte universitäre Einrichtung für den Maschinenbau in Deutschland. Unsere wissenschaftliche Exzellenz stützt sich dabei auf unsere zahlreichen Promovierenden und ihre hervorragenden Dissertationen. Viele dieser Dissertationen entstehen in lokaler, nationaler und internationaler Zusammenarbeit mit renommierten Universitäten und außeruniversitären Einrichtungen wie dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt, der Fraunhofer-Gesellschaft und der Max-Planck-Gesellschaft. Dabei reicht das inhaltliche Spektrum der Dissertationen von Biotechnik, Energietechnik, Fahrzeugtechnik, Kybernetik und Systemtechnik, Produktentwicklung und Konstruktionstechnik, Produktionstechnik bis hin zur Verfahrenstechnik und stützt sich auf die sechs Forschungsschwerpunkte Advanced Systems Engineering, Autonome Produktion, Software-Defined Manufacturing, Resiliente Versorgung, Biointelligenz und Dekarbonisierung der Industrie. Die Ergebnisse aus den Dissertationen zielen darauf ab, kunden-, produkt-, prozess- und mitarbeiterorientierte Technologie zielgerichtet und zeitnah zu entwickeln und anzuwenden.

Viele der im Rahmen der Forschungsarbeiten an den Instituten entstandenen Dissertationen werden in diesen »Beiträgen zum Stuttgarter Maschinenbau« veröffentlicht. Die beiden Fakultäten des Stuttgarter Maschinenbaus wünschen den Promovierenden, dass ihre Dissertationen aus dem Bereich des Maschinenbaus in der breiten Fachwelt als maßgebliche Beiträge wahrgenommen werden und so den Wissensstand auf ein neues Niveau heben.

Für den Stuttgarter Maschinenbau



Stefan Weihe



Oliver Riedel

## Vorwort der Herausgeber

Grundlage für gesellschaftlichen, wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Fortschritt ist Innovation. Diese entsteht aus dem Zusammenwirken von Technologie, Markt und Mensch. Die Betrachtung dieser drei Faktoren erfordert eine transdisziplinäre Zusammenarbeit und Integration unterschiedlicher Perspektiven und Fähigkeiten.

Die Forschung am Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement IAT der Universität Stuttgart und dem kooperierenden Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO zeichnet sich durch diese transdisziplinäre und integrierende Sichtweise aus. Hier wird Forschung mit der Überzeugung betrieben, für Fragestellungen aus der Praxis wissenschaftliche Lösungen zu finden und diese in die Anwendung zu bringen. Auf Basis eines gemeinsamen Verständnisses, welches den Menschen in den Mittelpunkt der Betrachtungen stellt, wird der Wandel von Organisationen und Gesellschaften systemisch untersucht. Darauf aufbauend werden empirisch fundierte Modelle und Lösungsansätze abgeleitet.

Dieser Herausforderung stellen sich die Promovierenden der Institute IAT und IAO und berichten ihre Erkenntnisse vorliegend in den »Beiträgen zum Stuttgarter Maschinenbau«. Mit dieser aktuellen Reihe wird die Arbeit der früheren Institutsleiter an IAT und IAO, Hans-Jörg Bullinger und Dieter Spath, zusammen mit Wilhelm Bauer fortgeführt und auf die Zukunft ausgerichtet. Wir Herausgeber wünschen den Autorinnen und Autoren, dass ihre Dissertationen aus den Bereichen Arbeitswissenschaft, Technologie- und Innovationsmanagement in der breiten Fachwelt als wichtige und maßgebliche Beiträge wahrgenommen werden und so den Wissensstand auf ein neues Niveau heben.



Univ.-Prof. Dr. Katharina Hölzle, MBA



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Oliver Riedel

**Methodik zur Unterstützung der Fabrikumbauplanung unter  
Verwendung eines aktualisierten digitalen  
Fabrikgebäudemodells**

Von der Graduate School of Excellence advanced Manufacturing  
Engineering der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

René Hellmuth  
aus Würzburg

Hauptberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Dieter Spath

Mitberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Mathias Liewald MBA

Tag der mündlichen Prüfung: 18.09.2023

Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement (IAT)  
der Universität Stuttgart

2023



## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand an der Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering (GSaME) der Universität Stuttgart in Kooperation mit dem Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO.

Ich bedanke mich bei allen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Für die Betreuung der Arbeit gilt ein besonderer Dank meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dieter Spath, der mir geduldig zur Seite stand und mich während der gesamten Bearbeitung mit wegweisenden Anmerkungen und konstruktiver Kritik unterstützt hat.

Dank gebührt weiterhin meinem Zweitgutachter, Herrn Prof. Mathias Liewald, für seine wertvollen Hinweise und Vorschläge, auf die ich mich insbesondere während der Überarbeitung der Dissertationsschrift stützen konnte.

Mein außerordentlicher Dank gilt Herrn Hans-Friedrich Jacobi. Er hat mich unermüdlich über meine gesamte GSaME-Zeit hinweg beraten und unterstützt. Nicht zuletzt durch die konstruktive Korrektur meiner Dissertation hat er zum Gelingen meiner Promotion beigetragen. Herr Jacobi und seine intensive Betreuung, die jedem Doktorand zu wünschen ist, war ein Garant für den erfolgreichen Abschluss meiner Dissertation.

Weiterhin danke ich Stephan Wilhem, der als Initiator meiner Dissertation anzusehen ist.

Ein großes Privileg einer Doktorarbeit ist die Zusammenarbeit mit vielen begeisterten und intelligenten Menschen. Ich hatte das Glück viele von ihnen, nicht nur an der GSaME oder am IAO, sondern auch bei wissenschaftlichen Konferenzen sowie in der Arena2036 zu treffen. Diese Menschen haben einen wichtigen Beitrag zur Arbeit an meiner Dissertation geleistet.

Privat danke ich meiner Familie insbesondere meinen Eltern, die mir hinsichtlich meiner Ausbildung immer uneingeschränkte Entscheidungsfreiheit gewährt haben. Bei meiner Partnerin Lisa bedanke ich mich für die entgegengebrachte Geduld und die immerwährende Erinnerung, dass unser Leben nicht nur aus Fabrikplanung besteht.

Stuttgart, 05.12.2023

René Hellmuth





## Zusammenfassung

Die Anforderungen der Fabrikplanung im Kontext zu erforderlichen Gebäudeänderungen haben sich in den letzten Jahren dahingehend gewandelt, dass die Planungshäufigkeit stark zugenommen hat und die dafür zur Verfügung stehende Planungsdauer kürzer geworden ist. Um die Wettbewerbsfähigkeit bestehender Fabriken erhalten zu können, gewinnt der Planungsfall „Umplanung“ immer mehr an gestalterischer sowie wirtschaftlicher Bedeutung. Herausforderungen sind dabei die oftmals veraltete Datengrundlage zu Gebäudeinformationen, die nicht mit der Realität übereinstimmt, sowie die Identifikation von Auswirkungen von Veränderungen.

Von dieser Defizitbetrachtung lässt sich der Gegenstandsbereich der vorliegenden Arbeit ableiten: Entwicklung einer Methodik zur Unterstützung der Fabrikumbauplanung unter Verwendung eines aktuellen digitalen Fabrikgebäudemodells, die sich aus den folgenden vier Einzelmethode zusammensetzt: (1) Aktualisierungsmethode für digitale Fabrikgebäudemodelle, (2) Change Impact Analyse, (3) Informationsanforderungserhebung für digitale Fabrikgebäudemodelle sowie die (4) Augmented Reality Informationsbereitstellung zur Entscheidungsunterstützung. Die Aktualisierungsprozesse für Punktwolken und Building Information Modelle in der Aktualisierungsmethode erlauben es, kleinteilige Änderungen des Fabrikgebäudes während des Betriebs der Fabrik mit kurzen Aufnahmedauern via Photogrammetrie aufzunehmen. Die entwickelte Aktualisierungsmethode gestattet somit das Vorhalten von permanent aktuellen digitalen Fabrikgebäudemodellen. Unter Einsatz der Change Impact Analyse erfolgt die Identifizierung der Auswirkungen von Anpassungen in der Produktion auf das Fabrikgebäude mithilfe eines entwickelten Softwarewerkzeugs. Anschließend wird in der dritten Methode die Informationsanforderungserhebung der Planungsbeteiligten aus den relevanten Disziplinen der Fabrik- und Industriebauplanung methodisch unterstützt. Um die aktualisierten Modelle nutzen zu können, stellt die Methodik in der vierten Methode ein Augmented Reality Softwarewerkzeug zur Verfügung. Damit lassen sich Umbaubesprechungen visuell und informativ unterstützen, indem relevante Informationen auf einem mobilen Endgerät vor Ort eingeblendet werden.

Die entwickelte Methodik unterstützt somit den Fabrikplaner sowie die Beteiligten aus der Produktions- und Industriebauplanung bei der Fabrikumbauplanung und führt zu einer Reduktion der Planungsdauer durch die Erhöhung der Veränderungsgeschwindigkeit bei Umbauplanungen innerhalb einer Fabrik. Dazu trägt die auf Photogrammetrie beruhende Aktualisierungsmethode bei. Die Anwendung der Photogrammetrie versetzt die Planer in die Lage, aktuelle geometrische Gebäudemodelle vorzuhalten, um bei den geforderten Umbaumaßnahmen direkt mit der Fabrikumbauplanung beginnen zu können.

## Abstract

The external and internal requirements of factory planning in the context of multiple building modifications have changed in recent years to the extent that the planning frequency has increased significantly. Consequently, the planning time available for this has reduced. In order to maintain the competitiveness of existing factories, the planning case of "conversion" is becoming increasingly important in terms of design and economy. The challenges here are the often outdated data basis for building information, which does not correspond to reality, and the identification of the effects of changes.

The subject of this thesis can be derived from this consideration of deficits: Development of a methodology to support factory conversion planning using an up-to-date digital factory building model, which is composed of the following four methods: (1) update method for digital factory building models, (2) change impact analysis, (3) information requirements elicitation for digital factory building models, and the (4) Augmented Reality information provision for decision support. The update processes for point clouds and Building Information Models in the update method makes it possible to record small-scale changes to the factory building during operation with short recording times via photogrammetry. The developed update method thus allows the maintenance of permanently up-to-date digital factory building models. Using the change impact analysis, the effects of adjustments in production on the factory building are identified with the help of a developed software tool. Subsequently, in the third method, the information requirements elicitation of those involved in planning from the relevant disciplines of factory and industrial building planning are methodically supported. In order to be able to use the updated models, the methodology provides an Augmented Reality software tool in the fourth method module. The Augmented Reality software tool is used to support conversion meetings visually and informatively by displaying relevant information on a mobile device on site.

The developed methodology thus supports the factory planner as well as those involved in production and industrial construction planning in factory conversion planning and leads to a reduction in planning time by increasing the speed of change in conversion planning within a factory. The update method based on photogrammetry contributes to this. The use of photogrammetry enables planners to have up-to-date geometric building models available in order to be able to start factory conversion planning directly when the required conversion measures are carried out.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>5</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>6</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>9</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>11</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>12</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>17</b>
1.1 Ausgangssituation .....	17
1.2 Problemstellung.....	19
1.3 Forschungsfragen und Zielsetzung.....	21
1.4 Forschungskonzeption .....	24
1.5 Aufbau der Arbeit .....	25
<b>2 Begriffsbestimmungen und Grundlagen</b> .....	<b>29</b>
2.1 Grundlagen der Fabrikplanung .....	29
2.2 Grundlagen der Industriebauplanung .....	37
2.3 Zwischenfazit.....	47
<b>3 Stand der Wissenschaft und Technik - Bestehende Ansätze, Defizite und Handlungsbedarf</b> .....	<b>49</b>
3.1 Ansätze zur Aktualisierung von Gebäudemodellen.....	49
3.2 Ansätze zur Identifikation der Auswirkungen von Veränderungen in der Produktion auf das Fabrikgebäude .....	54
3.3 Ansätze zur Erhebung von Informationsanforderungen der Planungsbeteiligten an das digitale Fabrikgebäudemodell .....	57
3.4 Ansätze zur Informationsbereitstellung und Entscheidungsunterstützung.....	59
3.5 Zwischenfazit und Handlungsbedarf.....	60
<b>4 Konzeption der Methodik zur Unterstützung der Fabrikumbauplanung</b> .....	<b>65</b>
4.1 Anforderungen an die Methodik zur Unterstützung der Fabrikumbauplanung.....	67
4.2 Grobkonzept der Methodik zur Unterstützung der Fabrikumbauplanung .....	69
4.3 Allokation der zu entwickelnden Methoden zur Unterstützung des Prozesses der Fabrikumbauplanung.....	72

4.4	Zwischenfazit.....	74
<b>5</b>	<b>Detaillierung der Einzelmethoden .....</b>	<b>75</b>
5.1	Methode 1: Aktualisierungsmethode für digitale Fabrikgebäudemodelle.....	75
5.2	Methode 2: Change Impact Analyse .....	84
5.3	Methode 3: Informationsanforderungserhebung für digitale Fabrikgebäudemodelle .....	89
5.4	Methode 4: Augmented Reality – Informationsbereitstellung .....	97
5.5	Zwischenfazit.....	102
<b>6</b>	<b>Verifikation und Validierung der Methodik .....</b>	<b>105</b>
6.1	Validierung Methode 1 .....	107
6.1.1	Fallstudie zum Verfahrensvergleich .....	107
6.1.2	Bewertung der Praxistauglichkeit .....	118
6.2	Validierung Methode 2.....	119
6.2.1	Fallstudie 1 .....	121
6.2.2	Fallstudie 2 .....	123
6.2.3	Fallstudie 3 .....	126
6.2.4	Fallstudie 4 .....	129
6.3	Verifikation Methode 3.....	131
6.4	Validierung Methode 4.....	134
6.5	Kritische Reflexion der Verifikation und Validierung.....	136
<b>7</b>	<b>Schlussbetrachtung .....</b>	<b>143</b>
7.1	Zusammenfassung.....	143
7.2	Ausblick.....	146
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>148</b>
	<b>Anhang.....</b>	<b>165</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Wandlungstreiber und resultierender Prozess der Fabrikumbauplanung in Anlehnung an [Löffler 2011, S. 29], [Wulf 2011, S. 24], [Delbrügger et al. 2017, S. 364].....	18
Abb. 2: Detaillierter Fabrikumbauprozess im Fabriklebenszyklus angelehnt an [Delbrügger et al. 2017, S. 364].....	20
Abb. 3: Ausgangssituation, Lösungsansatz und vorgeschlagene Methodik der vorliegenden Arbeit.....	23
Abb. 4: Aufbau der Arbeit und forschungsmethodologische Vorgehensweise in Anlehnung an [Ulrich & Hill 1976a, S. 348], [Ulrich 1984, S. 193] .....	26
Abb. 5: Domänen der Fabrikplanungsontologie in Anlehnung an [Burggräf 2012, S. 15] .....	30
Abb. 6: Planungsfälle der Fabrikplanung in Anlehnung an [Grundig 2018, S. 17–19].....	31
Abb. 7: Detaillierte Phasen des Prozesses der Fabrikumbauplanung sowie des Fabrikumbaus in Anlehnung an [Pawellek 2014, S. 165–188], [Delbrügger et al. 2017, S. 364] .....	32
Abb. 8: Darstellung von Auswirkungen der Erhöhung der Veränderungsgeschwindigkeit in Anlehnung an [Hartkopf 2013, S. 10] .....	34
Abb. 9: Fabrikobjekte des Industriebaus und der Produktion nach [Heger 2006, S. 155–163] .....	37
Abb. 10: Zusammenhang von LOG, LOI und LOD in Anlehnung an [VDI 2552 - 1, S. 40] .....	39
Abb. 11: Planungsbeteiligte einer Fabrikplanung .....	40
Abb. 12: Planungsstände und Einsatzphasen von BIM-Modellen .....	42
Abb. 13: Überblick von Bestandserfassungsmethoden und -techniken im Gebäudebereich in Anlehnung an [Volk et al. 2014, S. 119] .....	44
Abb. 14: Aufnahmeprinzip des Laserscannings (links) und der Photogrammetrie (rechts) .....	45
Abb. 15: Die drei Perspektiven der Aktualisierungsansätze im Gebäudekontext.....	50
Abb. 16: Beurteilung der betrachteten Forschungsarbeiten.....	63
Abb. 17: Methode und Methodik .....	66
Abb. 18: Ableitung von Anforderungen aus den Defiziten .....	68
Abb. 19: Regelkreismodell des Umbaus einer Fabrik in Anlehnung an [Heger 2006, S. 27]....	70
Abb. 20: Zuordnung der Anforderungen zu den Methoden .....	71
Abb. 21: Gesamtdarstellung aller Prozessschritte, in denen die Methoden in Bezug auf die Zielerreichung unterstützen .....	73
Abb. 22: Prozessdarstellung der Änderungsdetektion.....	76
Abb. 23: Prozessdarstellung zur Aktualisierung einer Punktwolke .....	78
Abb. 24: Beispiel einer Planung (links) und Durchführung (rechts) zur Erfassung eines teilweise freistehenden Objektes .....	79
Abb. 25: Prozessdarstellung zur Aktualisierung eines BIM Modells .....	81
Abb. 26: Gesamtdarstellung des Aktualisierungsprozesses (Methode 1).....	83

Abb. 27: Beispielhaftes Planungsmodul der Fabrikplanung in Anlehnung an [Nöcker 2012, S. 134].....	85
Abb. 28: Modell der Interdependenzen .....	86
Abb. 29: Beispielhaftes Planungsmodul Starkstromanlagenplanung (SAP) mit ein- und ausgehenden Planungsinformationen nach [Meckelnborg 2015, S. 248].....	87
Abb. 30: Abgeleitete Informationsanforderungskategorien für digitale Gebäudemodelle.....	91
Abb. 31: Informationsanforderungsschablone in Anlehnung an [Rupp 2014, S. 220] .....	92
Abb. 32: LOD-Zuordnungsmatrix .....	94
Abb. 33: Gesamtdarstellung der Informationsanforderungserhebung für digitale Fabrikgebäudemodelle .....	96
Abb. 34: Bestbewertetes UI-Konzept .....	98
Abb. 35: AR-Softwarewerkzeug während der Anwendung.....	100
Abb. 36: User Interface des AR-Softwarewerkzeugs .....	101
Abb. 37: Gesamtprozess der Anwendung des AR-Softwarewerkzeugs .....	101
Abb. 38: Überblick über die dem Prozess der Fabrikumbauplanung zugeordneten Methoden .....	103
Abb. 39: Zusammenhänge der Einzelmethode innerhalb der Gesamtmethodik .....	106
Abb. 40: Änderungsdetektion via Objekterkennung .....	109
Abb. 41: Punktwolkendichte des Datensatzes D1 der Nikon D810.....	114
Abb. 42: Punktwolkendichte des Datensatzes D1 des FARO Focus <sup>S</sup> 350.....	116
Abb. 43: Überlagerung BIM-Modell mit aktualisierter Punktwolke .....	118
Abb. 44: Mit der Change Impact Analyse identifizierte Auswirkungen geänderter Maschinen- und Anlageneigenschaften auf die Fabrikobjekte .....	123
Abb. 45: Mit der Change Impact Analyse identifizierte Auswirkungen der geänderten Mitarbeiterzahl auf die Fabrikobjekte .....	125
Abb. 46: Mit der Change Impact Analyse identifizierte Auswirkungen durch geänderten Ist-Wertstrom auf die Fabrikobjekte .....	126
Abb. 47: Mit der Change Impact Analyse identifizierte Auswirkungen geänderter Stückzahlenszenarien auf die Fabrikobjekte.....	128
Abb. 48: Mit der Change Impact Analyse identifizierte Auswirkungen der geänderten Stückzahlenszenarien auf die Fabrikobjekte.....	130
Abb. 49: Mit der Change Impact Analyse identifizierte Auswirkungen eines geänderten Produktionsprogrammes auf die Fabrikobjekte .....	131
Abb. 50: LOD-Zuordnungsmatrix .....	133
Abb. 51: Ergebnisse der Bewertung der Wiedergabedimensionen des 2D PowerPoint Plans und des 3D AR-Softwarewerkzeugs .....	135
Abb. 52: Bewertung der Methodik basierend auf der durchgeführten Verifikation und Validierung .....	141
Abb. 53: Gesamtübersicht der entwickelten Methodik mit Eigenentwicklungsanteil .....	145

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Quellennachweise der Abbildung 15 .....	51
Tab. 2: Informationsanforderungsliste .....	93
Tab. 3: Ausgewählte Systemkomponenten für das AR-Softwarewerkzeug.....	99
Tab. 4: Vergleich der Dauer - Aufnahmezeit vor Ort.....	110
Tab. 5: Vergleich der Dauer - Nachbearbeitungszeit .....	111
Tab. 6: Vergleich der Gerätekosten.....	112
Tab. 7: Vergleich der entstehenden Datenmenge.....	112



## Abkürzungsverzeichnis

2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
AAP	Außenanlagenplanung
Abb.	Abbildung
ALS	Airborne Laser Scanning
APG	Arbeitsplatzgestaltung
API	Application Programming Interface
AR	Augmented Reality
ArbStättV	Arbeitsstättenverordnung
ATP	Architektonische Planung
AWG	Planung der Wasser-, Abwasser- und Gasanlagen
BauGB	Baugesetzbuch
BFS	Breadth-First Search
BIM	Building Information Modeling
BSP	Brandschutzplanung
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CAD	Computer Aided Design
CDE	Common Data Environment
CIA	Change Impact Analysis
CIM	Computer-integrated manufacturing
CPS	Cyber-physisches System
d. h.	das heißt
DIN	Deutsches Institut für Normung
DSM	Design Structure Matrix
DVP	Deutscher Verband der Projektmanager in der Bau- und Immobilienwirtschaft e.V.

EBP	Energie- und Bauphysikplanung
EDM	Elektronische Distanzmessung
EnEG	Energieeinsparungsgesetz
etc.	et cetera
et al.	et alii (und andere)
f.	folgende
FAP	Fassadenplanung
FBX	Filmbox
FF	Forschungsfrage
ff.	fortfolgende
FGSG	Fertigstellungsgrad
FTF	Fahrerloses Transportfahrzeug
FF	Forschungsfrage
GAP	Gebäudeautomationsplanung
GBB	Planung der Gründung und Bodenbelastung
GPS	Global Positioning System
GPU	Graphics Processing Unit
HBIM	Historic Building Information Modeling
HLKS	Heizung-Lüftung-Klima-Sanitär
HOAI	Honorarordnung für Architekten und Ingenieure
IAP	Innenausbauplanung
ICP	Iterative Closest Point
IDM	Information Delivery Manual
IFC	Industry Foundation Classes
IndBauRL	Industriebaurichtlinie
IoT	Internet of Things
ISO	International Organization for Standardization
KAP	Kapazitätsplanung

kN	Kilonewton
KVA	Planung der Kälteanlagen für raumluftechnische Anlagen
LAY	Layout
LBO	Landesbauordnung
LOD	Level of Development
LOG	Level of Geometry
LOI	Level of Information
LP	Leistungsphase
m	Meter
MDM	Multiple Domain Matrix
MLS	Mobile Laser Scanning
mm	Millimeter
MVD	Model View Definition
MVS	Multi-View Stereo
NF	Nutzfläche
PC	Personal Computer
PER	Personal- und Organisationsplanung
PLP	Produktionslogistikplanung
PM	Planungsmodul
PMP	Produktionsmittelplanung
PRG	Produktionsprogrammanalyse
PRO	Produktanalyse
PSP	Produktionsstrukturplanung
PST	Produktionssteuerungsplanung
PZA	Prozessanalyse
r	Radius
REFA	Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung
RFID	Radio-frequency identification

RGB	Rot-Grün-Blau
RLT	raumluftechnisch
RTA	Planung der raumluftechnischen Anlagen
SAP	Starkstromanlagenplanung
SfM	Structure from Motion
SIFT	Scale-invariant feature transform
SIPOC	Supplier – Input – Process – Output - Customer
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping
SynFaP	Synergetische Fabrikplanung
Tab.	Tabelle
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
TKP	Technologiekettenplanung
TLS	Terrestrisches Laserscanning
TWP	Tragwerksplanung
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UI	User Interface
VPF	Veränderungsbefähiger
VBL	Vergabe von Bauleistungen
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDI-GPL	VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik e.V.
vgl.	vergleiche
VR	Virtual Reality
WIB	Wirtschaftlichkeitsberechnung
WSP	Werkstrukturplanung
WVA	Planung der Wärmeversorgung
z. T.	zum Teil



# 1 Einleitung

Menschen verbringen ca. 90 % ihres Lebens innerhalb von Gebäuden [Clausen et al. 2003, S. 3]. Einen großen Teil ihrer Lebenszeit verbringen Arbeitnehmer an ihrem Arbeitsplatz. Die Planung und der Betrieb von Arbeitsumgebungen ist daher von zentraler sozialer, ökologischer sowie ökonomischer Relevanz [Clausen et al. 2003, S. 9 f.] In der Industrie schreitet die digitale Umgestaltung der Fabriken im Zuge der 4. industriellen Revolution kontinuierlich voran. Internationale Technologiekonzerne entwickeln ihre Produkte und technischen Anlagen seit einiger Zeit entlang des Produktlebenszyklus auf Basis von digitalen Modellen und Zwillingen [Horler et al. 2019, S. 679]. In Anbetracht der Bedeutung des Gebäudes in der Fabrikplanung werden digitale Gebäudemodelle bisher nicht konsequent eingesetzt [Burggräf et al. 2019, S. 143].

## 1.1 Ausgangssituation

Mit dem verstärkten Einsatz der Methode „Building Information Modeling (BIM)“ in den Bereichen Architektur, Ingenieurwesen und Bauwesen hat die modellgestützte Gebäudeplanung und -bewirtschaftung während der Betriebsphase sowohl in der Forschung als auch in der Praxis einen hohen Stellenwert erreicht [Akcamete et al. 2010, S. 3 f.], [Aziz et al. 2016, S. 354], [Yilmaz et al. 2019, S. 246 f.]. Grundvoraussetzung für den Einsatz digitaler Fabrikgebäudemodelle in der Betriebsphase von Fabriken ist eine durchgängig digitale Datennutzung und ein effizienter Datenaustausch bei bspw. Wartungsarbeiten oder Umbaumaßnahmen. In der Fabrikplanung haben sich die Anforderungen an das betreffende Gebäude ausgehend von internen und externen Wandlungstreibern in den letzten Jahren dahingehend gewandelt, als die Planungshäufigkeit stark zugenommen hat und gleichzeitig die dafür zur Verfügung stehende Planungsdauer kürzer geworden ist [Westkämper et al. 1997, S. 640], [Spath et al. 2002, S. 29], [Blumenau 2006, S. 2], [Hartkopf 2013, S. 2], [Burggräf et al. 2021b, S. 57]. Bei den Planungsaufgaben der Fabrikplanung gewinnen Umplanungen immer mehr an Bedeutung, da nur so die Wettbewerbsfähigkeit einer Fabrik erhalten oder auch gesteigert werden kann [Harms 2004, S. 6 f.], [Beller 2010, S. 23], [Meckelnborg 2015, S. 22], [Schindler 2019, S. 2]. Fabrikumbauplanungen sind zurückzuführen auf einen immer größer werdenden Wettbewerbsdruck, der sich aus dem Unternehmensumfeld durch Megatrends, Veränderungstreiber und Turbulenzen ableitet (Abb. 1). Diese Veränderungstreiber müssen durch einen reaktionsschnellen Strukturwandel abgefangen werden können [Spath et al. 2002, S. 28]. Von den Megatrends beeinflusst und heruntergebrochen treten Veränderungs- bzw. Wandlungstreiber auf, welche die industrielle Produktion direkt beeinflussen (Abb.

1). Für die Strukturveränderung einer Fabrik werden die Turbulenzfaktoren in die externen Hauptwandlungstreiber Märkte und Umfeld sowie in die internen Wandlungstreiber Produkte und Produktion gegliedert [Löffler 2011, S. 29 f.]. Die in Abb. 1 dargestellten Veränderungstreiber können einen Fabrikumbau auslösen, der aus dem Prozess der Fabrikumbauplanung und dem resultierenden Fabrikumbau besteht.

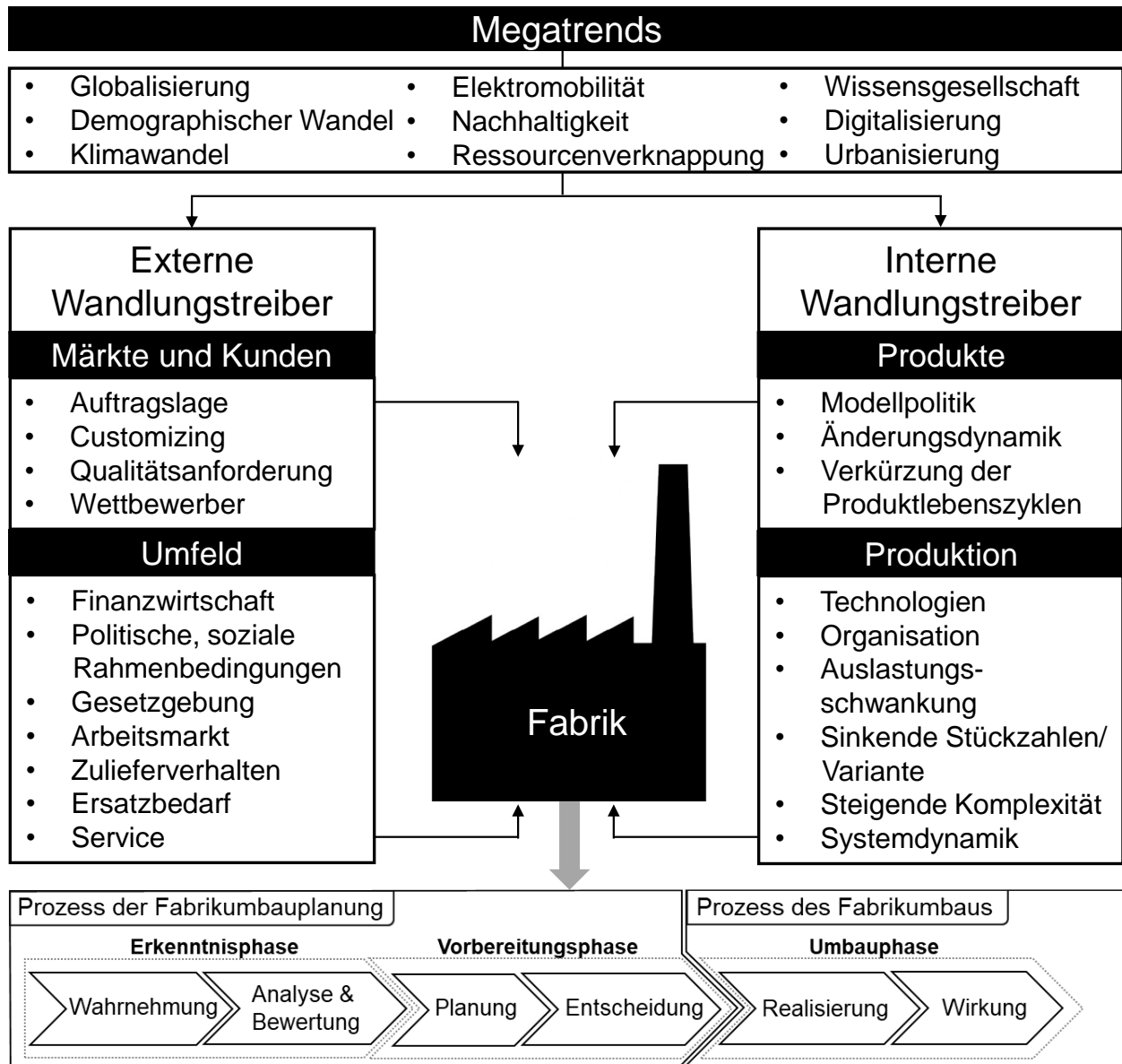


Abb. 1: Wandlungstreiber und resultierender Prozess der Fabrikumbauplanung in Anlehnung an [Löffler 2011, S. 29], [Wulf 2011, S. 24], [Delbrügger et al. 2017, S. 364]

Der zunehmende Zeitdruck in der Produktentwicklung führt zu einer Verkürzung der Umplanungszeit bei der Fabrik- und Gebäudeplanung. Da oft belastbare Prognosen zur Planung der Produkte und damit folglich auch der Produktion fehlen, müssen Fabrikplaner in unsicheren Märkten die Fähigkeit entwickeln, auf ständige Veränderungen kurzfristig reagieren zu können. Die Schnittstellen zwischen der Fabrik- und Gebäudeplanung sowie die Aktualität der Planungsgrundlage

(digitales Fabrikgebäudemodell) sind bei Umbauprozessen entscheidend, um die immer wieder neu entstehenden Anforderungen gebäudeseitig erfüllen zu können [Burggräf et al. 2019, S. 143-145], [Ebade Esfahani et al. 2019, S. 260], [Graefenstein et al. 2020, S. 6580 f.], [Lenz et al. 2019, S. 2]. Der Einsatz von digitalen Fabrikgebäudemodellen kann die Betriebsphase einer Fabrik jedoch nur dann unterstützen, wenn die darin beinhalteten Daten aktuell sind und den realen Gebäudezustand verlässlich widerspiegeln [Rieke et al. 2021, S. 881].

## 1.2 Problemstellung

Derzeit stellt eine Umplanung, von der das Fabrikgebäude betroffen ist, einen komplexen und ressourcenintensiven Prozess dar. In der Vergangenheit sind Fabrikgebäude als „statische“ Elemente aufgefasst und selten in die Betrachtung hinsichtlich der Aspekte Zukunftsorientierung und Wandlungsfähigkeit von Fabriken einbezogen worden. Dies ist auf die im Vergleich zum Fabrikgebäude kurzen Produkt- bzw. Technologielebenszyklen zurückzuführen [Weskämper & Niemann 2009, S. 525], [Pawellek 2014, S. 23]. Die kurzen Lebenszyklen verursachen während der Betriebsphase der Fabrik einen mehrmaligen Produkt- bzw. Technologiewechsel, was wiederum geänderte Anforderungen an das Fabrikgebäude bewirkt und Umbaumaßnahmen des Fabrikgebäudes notwendig werden lässt [Wulf 2011, S. 26], [Dannapfel et al. 2019, S. 521].

Manuell durchgeführte oder technologisch unterstützte Ist-Analysen durch terrestrisches Laserscanning (TLS) sind bei der Datenermittlung für Umplanungen, die den Zustand der Gebäudestruktur beinhalten, die Regel [Melcher et al. 2018, S. 267], [Schindler 2019, S. 3], [Lenz 2020, S. 47], [Graefenstein et al. 2020, S. 6583]. Besonders die „Ad hoc Bestandserfassung“ von aktuellen und belastbaren Planunterlagen (Abb. 2) im Fabrikbestand ist mit momentan verfügbaren Methoden zeitaufwändig und bietet somit ein wirksames Verbesserungspotenzial [Schindler 2019, S. 1], [Lu et al. 2020, S. 7]. Auch in Fabriken, die bereits über eine Datengrundlage zu Gebäudeinformationen verfügen, stimmen die Pläne bzw. Modelle häufig nicht mit der Realität überein [Neumann 2014, S. 2]. Die Datenaufnahme bezüglich der aktuellen Gebäudesituation kann so die Projektkosten bei Umplanungen deutlich erhöhen und den Projektabschluss zeitlich verzögern [Melcher et al. 2018, S. 267]. Zusätzlich finden Aktualisierungen der Gebäudeplanunterlagen aufgrund der Vielzahl während des Betriebs einer Fabrik stattfindenden kleinteiligen Anpassungen des Fabrikgebäudes nicht schnell und aufwandsarm genug statt, sodass die eigentlich notwendige, fortlaufende Aktualisierung vernachlässigt wird [Zäh et al. 2004, S. 56], [Wien-dahl et al. 2014, S. 587], [Terkaj et al. 2015, S. 452], [Lenz 2020, S. 5]. In diesem Kontext besteht die wesentliche Problemstellung bei einem Umbauprozess (Abb. 2) daraus, dass auf aktuelle Gebäudeinformationen nicht zurückgegriffen werden [Pawellek 2014, S. 173] kann, die als



Grundlage für Entscheidungen vor Ort notwendig wären. Daraus resultiert eine Verzögerung bei Umbauprozessen (Abb. 2).

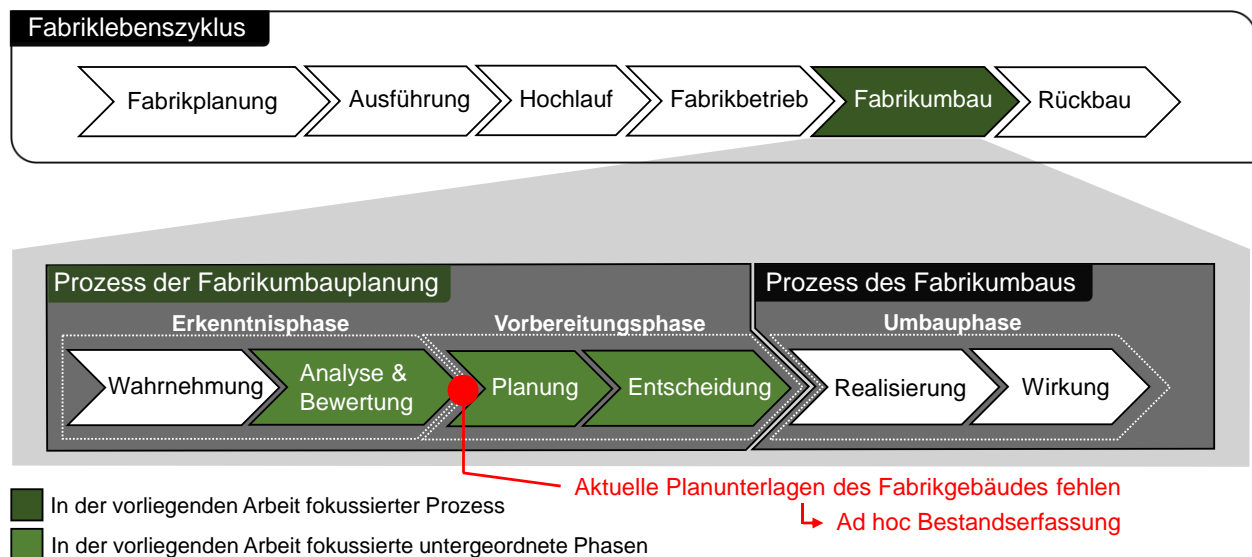


Abb. 2: Detaillierter Fabrikumbauprozess im Fabriklebenszyklus angelehnt an [Delbrügger et al. 2017, S. 364]

Eine weitere Problemstellung im Kontext der Fabrikumbauplanung stellt die Auswirkungsanalyse dar. Zu Beginn einer Umplanung lassen sich die vielfältigen Auswirkungen von Anpassungsmaßnahmen in der Produktion auf das Fabrikgebäude nur zeitaufwändig und kostspielig kalkulieren [Kerber 2015, S. 30], [Lübke mann & Nyhuis 2016, S. 7], [Hingst et al. 2022b, S. 7].

Der Umbau eines Fabrikgebäudes stellt aufgrund der Vielzahl verschiedener Projektbeteiligter, der Einbeziehung der Fabrik als soziotechnisches System und das Beachten weiterer Faktoren, wie Umbauen im Bestand bei laufendem Betrieb, eine Planungsaufgabe dar, die häufig die Terminziele nicht erreicht [Reinema et al. 2013, S. 115]. Dabei erwächst bei der steigenden Anzahl an Umplanungen die Forderung nach einer zunehmenden Reaktionsfähigkeit der Umplanungsprozesse. Dazu bedarf es einer engeren Zusammenarbeit der am Umplanungsprozess beteiligten Disziplinen [Kerber 2015, S. 41]. Das systematische Ermitteln der Informationsanforderungen an ein digitales Fabrikgebäudemodell ist für dessen Einsatz bei Umplanungen eine Grundvoraussetzung [Kerber 2015, S. 41], [Burggräf et al. 2019, S. 145], [Rieke et al. 2021, S. 886]. Die Erhebung von Informationsanforderungen der beteiligten Planungsdisziplinen (Produktions- und Industrie bauplanung) während des Umbauprozesses wird jedoch bisher nicht methodisch unterstützt.

Zudem bildet der Zugriff auf die aktuelle geometrische Modellgrundlage die Basis der Informationsinfrastruktur für die weitere Planung des Umbauprozesses eines Fabrikgebäudes (Abb. 2). Ungeachtet dessen werden gegenwärtig keine aktuellen digitalen Fabrikgebäudemodelle zur Entscheidungsunterstützung bei Fabrikumbauprozessen vor Ort bereitgestellt.

Insgesamt lassen sich folgende Defizite in Bezug auf die Fabrikumbauplanung mit Fokus auf das Fabrikgebäude zusammengefasst nennen:

- Eine Aktualisierungsmethode für ein digitales Fabrikgebäudemodell, mit der eine fortlaufende Aktualisierung kleinteiliger Objekte durchgeführt werden kann, liegt nicht vor
- Bei Änderungen in der Produktion sind die Auswirkungen auf das Fabrikgebäude unklar bzw. aufwändig zu ermitteln
- Das systematische Erheben der Informationsanforderungen an ein digitales Fabrikgebäudemodell von beteiligten Planungsdisziplinen während des Prozesses der Fabrikumbauplanung wird bisher nicht methodisch unterstützt
- Der Zugriff auf aktuelle, modellbasierte Informationen zur Entscheidungsunterstützung bei Umbauprozessen wird vor Ort nicht bereitgestellt

Es fehlt somit eine Methodik zur Unterstützung der Fabrikumbauplanung unter Verwendung eines aktuellen digitalen Fabrikgebäudemodells, welche die genannten Defizite adressiert.

### **1.3 Forschungsfragen und Zielsetzung**

Vor dem Hintergrund der dargelegten Ausgangssituation und Problemstellung lassen sich eine handlungsleitende Forschungsfrage sowie vier untergeordnete Forschungsfragen (FF) ableiten:

#### **Handlungsleitende Forschungsfrage:**

Wie können produzierende Unternehmen beim Prozess der Fabrikumbauplanung hinsichtlich der Fabrikgebäude unterstützt werden, um den bisherigen Defiziten in der Erkenntnis- und Vorbereitungsphase zu begegnen?

Forschungsfragen:

- **FF 1:** Welches strukturierte Vorgehen eignet sich, um ein digitales Fabrikgebäudemodell aktuell zu halten?
- **FF 2:** Wie können bei einem Fabrikumbau die Auswirkungen auf das Fabrikgebäude identifiziert werden?
- **FF 3:** Wie können Informationsanforderungen der beteiligten Planer bei einem Fabrikumbau aus der Produktions- und Industriebauplanung an das digitale Fabrikgebäudemodell erhoben werden?

- **FF 4:** Wie kann der Zugriff auf das aktuelle digitale Fabrikgebäudemodell während des Umbauprozesses in der Fabrik bereitgestellt werden, um Entscheidungen zu unterstützen?

Mit Bezug auf die Forschungsfragen ist es das wissenschaftliche Ziel dieser Arbeit, eine Methodik, die auf Einzelmethoden basiert, zur Unterstützung der Fabrikumbauplanung zu entwickeln. Der Gegenstandsbereich der Forschung umfasst die Fabrikgebäude des produzierenden Gewerbes. Insbesondere bei Produktionsunternehmen ist eine erhöhte Frequenz von Adaptionen und Umbaumaßnahmen der Produktionssysteme zu beobachten [Landherr 2014, S. 4 f.], [Westkämper 2014, S. 14], [Küber 2017, S. 5], deren Auswirkungen sich auf viele Fabrikbereiche, wie dem Fabrikgebäude, erstrecken.

Zu Beginn soll für die Methodik eine Vorgehensweise zur Aktualisierung von digitalen Fabrikgebäudemodellen entwickelt werden (Methode 1, Abb. 3). Darauf folgt die Identifikation der Auswirkungen von Änderungen in der Produktion auf das Fabrikgebäude (Methode 2, Abb. 3). Anschließend ist es erforderlich, die unterschiedlichen Informationsanforderungen der Planungsbeteiligten aus den Disziplinen der Produktions- und Industriebauplanung an das digitale Fabrikgebäudemodell zu erheben (Methode 3, Abb. 3). Abschließend ist vorgesehen, dass die aktuellen digitalen Fabrikgebäudemodelle mobil und vor Ort bereitgestellt werden (Methode 4, Abb. 3). Hierdurch soll während der Fabrikumbauplanung auf aktuelle, digitale Fabrikgebäudemodelle zugegriffen werden, um damit die Reaktionsfähigkeit bei Umbauprojekten in bestehenden Fabriken zu erhöhen. Die Methoden 2, 3 und 4 laufen sequenziell ab. Die Methode 1 ist als parallel mitlaufender Prozess zu sehen, der permanent aktuelle Gebäudemodelle bereitstellt (Abb. 3).

Konkret ist es das Ziel durch das Vorhalten eines aktuellen digitalen Fabrikgebäudemodells und die damit gesteigerte Datenaktualität die Umplanungsdauer im produzierenden Gewerbe zu verkürzen. Zeitaufwändige ad hoc Bestandserfassungen werden dadurch obsolet. Übergeordnet soll die Methodik durch die Verkürzung der Umplanungszeit, einen erkennbaren Beitrag zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit eines produzierenden Unternehmens leisten.

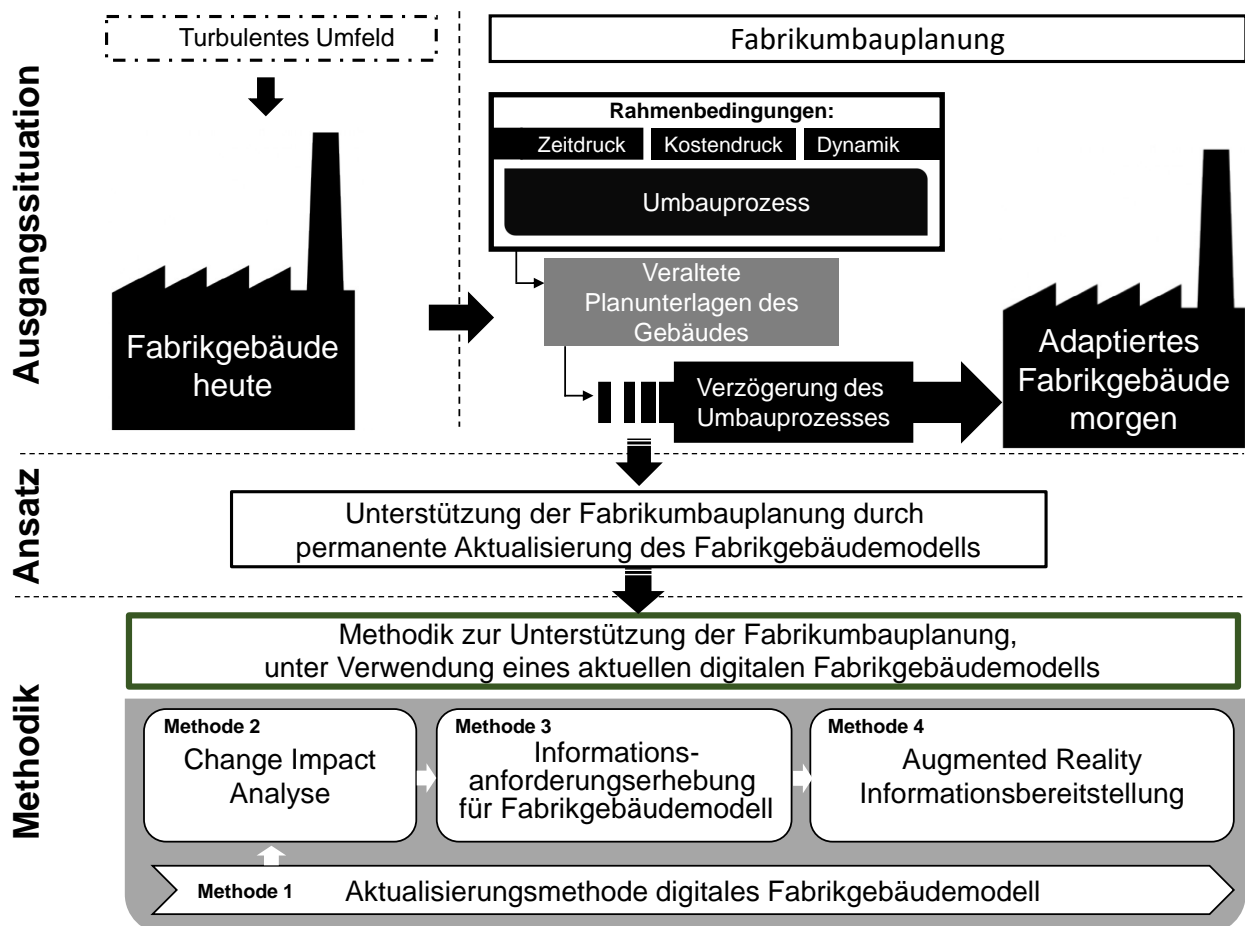


Abb. 3: Ausgangssituation, Lösungsansatz und vorgeschlagene Methodik der vorliegenden Arbeit

Unter dem Aspekt „Anwendung“ ist es erforderlich, eine Methodik bereitzustellen, welche die Umplanung von Fabriken bei Gebäudeveränderungen unterstützt. Die Teilaufgaben der Forschung lassen sich hinsichtlich der Forschungsfragen und deren Beantwortung in Einzelmethoden wie folgt zusammenfassen (FF 1 zu Methode 1 usw.):

- **Ziel Methode 1:** Inkrementelle Aktualisierungsmethode für die Aufnahme partieller, kleinteiliger Änderungen des Fabrikgebäudes zur Verfügung stellen, um digitale Fabrikgebäudemodelle während der Betriebsphase aktuell zu halten.
- **Ziel Methode 2:** Interdependenzen und Auswirkungen auf das Fabrikgebäude identifizieren.
- **Ziel Methode 3:** Unterstützung bei der Erhebung von Informationsanforderungen der Planungsbeteiligten an das digitale Fabrikgebäudemodell leisten.
- **Ziel Methode 4:** Entscheidungsfindung durch die mobile Bereitstellung der aktuellen Fabrikgebäudemodelle unterstützen.

## 1.4 Forschungskonzeption

Die abgeleiteten Forschungsaufgaben aus der Zielsetzung werden in der vorliegenden Forschungsarbeit bearbeitet. Das Aufgreifen der Zielsetzung durch die vorliegende Arbeit zeichnet sich durch eine systematische Vorgehensweise aus [Töpfer 2012, S. 221], die auf die konkrete Problemstellung zugeschnitten ist. Als forschungsmethodologisches Vorgehen die explorative Forschung nach Kubicek gewählt [Kubicek 1976, S. 12–16]. Das Vorgehen der explorativen Forschung wird insofern angewandt, als die Arbeit den Handlungswissenschaften zuzuordnen ist und mit der Zielsetzung ein Wissenschaftsziel mit Anwendungsbezug verfolgt wird [Schanz 1987, S. 2189–2197]. Die explorative Forschung gilt als geeignet, wenn die praktische Nutzbarkeit der Forschungsergebnisse angestrebt wird [Kubicek 1976, S. 5]. In durchgeführten Forschungsprojekten der Disziplin Fabrikplanung konnte die explorative Forschung bereits erfolgreich anwendungsorientiert eingesetzt werden [Meckelnborg 2015; Krunke 2017; Graefenstein 2019]. Zur Erlangung von wissenschaftlichen Erkenntnissen liegt der explorativen Forschung ein iterierender Lernprozess zugrunde [Tomczak 1992, S. 84]. Ausgangspunkt für die Untersuchung ist die Entwicklung eines Bezugsrahmens, mit dem sich vorhandenes Wissen strukturieren lässt [Rößl 1990, S. 100 f.], [Deimling 2019, S. 110 f.]. Vorhandenes Wissen setzt sich aus dem theoretischen Vorwissen des Forschers, aus Ergebnissen von Experimenten und aus einer Literaturanalyse zusammen [Rößl 1990, S. 101], das in Form von Fragen an die Praxis formuliert wird (vgl. Kapitel 1.3).

Den vier Forschungsfragen (Kapitel 1.3) liegen Hypothesen zugrunde, die sowohl durch Forschungsprojekte als auch durch semistrukturierte, leitfadenbasierte Experteninterviews [Bogner 2014, S. 3] und Workshops validiert werden (Kapitel 6):

- **Hypothese 1:** Photogrammetrische Aktualisierungen von digitalen Fabrikgebäudemodellen sind hinsichtlich Aufnahmedauer vor Ort, Dauer der Nachbearbeitung, der Gerätekosten, der Genauigkeit und der entstehenden Dateigröße im Vergleich zu Aktualisierungen via Laserscans für die Praxis relevant.
- **Hypothese 2:** Die Auswirkungen von Veränderungen in der Produktion auf Fabrikobjekte des Gebäudes können automatisiert und zuverlässig identifiziert werden.
- **Hypothese 3:** Die Anpassung des Requirements Engineerings ermöglicht die systematische Erhebung von Informationsanforderungen der Planungsbeteiligten an das digitale Fabrikgebäudemodell.

- **Hypothese 4:** Aktuelle digitale Fabrikgebäudemodelle können vor Ort zur Unterstützung der Fabrikumbauplanung zur Verfügung gestellt werden und liefern eine Unterstützung bei der räumlichen Einschätzung von Umbaumaßnahmen.

Aus wissenschaftlicher Reflexion und Abstraktion der Erkenntnisse resultieren theoretische Aussagen, die wiederum neue Fragen an die Realität hervorbringen. Liefern die gewonnenen Aussagen eine hinreichend genaue Lösung zur Beantwortung der Forschungsfragen, gilt der iterative Forschungsprozess als abgeschlossen. Die folgende Abhandlung gibt den letzten Stand des iterativen Forschungsprozesses wieder. Das Forschungsprojekt stellt das Sammeln von Daten durch Versuche unter anderem im praktischen Kontext der Arena2036, der Forschungsfabrik der Universität Stuttgart, sicher.

Um die Forschungskonzeption der vorliegenden Arbeit abzuschließen, wird eine Abgrenzung des Gegenstandsbereichs der Forschung vorgenommen. Betrachtet werden Umplanungsprozesse in Brownfield-Fabrikstrukturen. Dabei stehen die Umplanungsfälle „Anpassung“ und „Erweiterung“ im Fokus. Die übrigen Planungsfälle, wie die „Neuplanung“, „Revitalisierung“ und der „Rückbau“ [Schenk et al. 2014, S. 287] einer Fabrik (Abb. 6), werden nicht betrachtet. Bei „Anpassungen“ und „Erweiterungen“ werden ausschließlich Umbaumaßnahmen betrachtet, in die das Fabrikgebäude einzubeziehen ist. Eine Adressierung der Tätigkeitsfelder Reorganisation und Rekonfiguration findet nicht statt. Der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit liegt bzgl. des Prozesses der Fabrikumbauplanung (Abb. 2) auf den Phasen „Analyse & Bewertung“, „Planung“ und „Entscheidung“. Die Phasen „Wahrnehmung“, „Realisierung“ und „Wirkung“ sind nicht Bestandteil der vorliegenden Arbeit. Zudem liegen Produktionsnetzwerke außerhalb des Betrachtungsfokus, da sich der Prozess der Fabrikumbauplanung (Abb. 2) nur auf ein einzelnes Fabrikgebäude bezieht. Die in der Literatur genannten Fabrikgestaltungsfelder Mensch und Führung [Wirth et al. 1999, S. 39], [Heger 2006, S. 10] werden zudem nicht untersucht. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit kommen nur die Gestaltungsfelder Technik, Organisation und Raum in Betracht [Wirth et al. 1999, S. 39], da in der technischen Fabrikumbauplanung nur die darin beinhalteten Fabrikobjekte unmittelbar gestaltet werden können.

## 1.5 Aufbau der Arbeit

Der gewählten Forschungsmethodologie entsprechend basiert der Aufbau der Dissertation auf der Strategie angewandter Forschung nach [Ulrich & Hill 1976b, S. 305], [Ulrich 1984, S. 192–195]. Der darin vorgeschlagene, die Nutzbarkeit der Forschungsergebnisse unterstützende Aufbau, wird durch den gewählten explorativen Forschungsansatz nach [Kubicek 1976, S. 12–16] untermauert. Die Arbeit ist in sieben Kapitel gegliedert (Abb. 4).

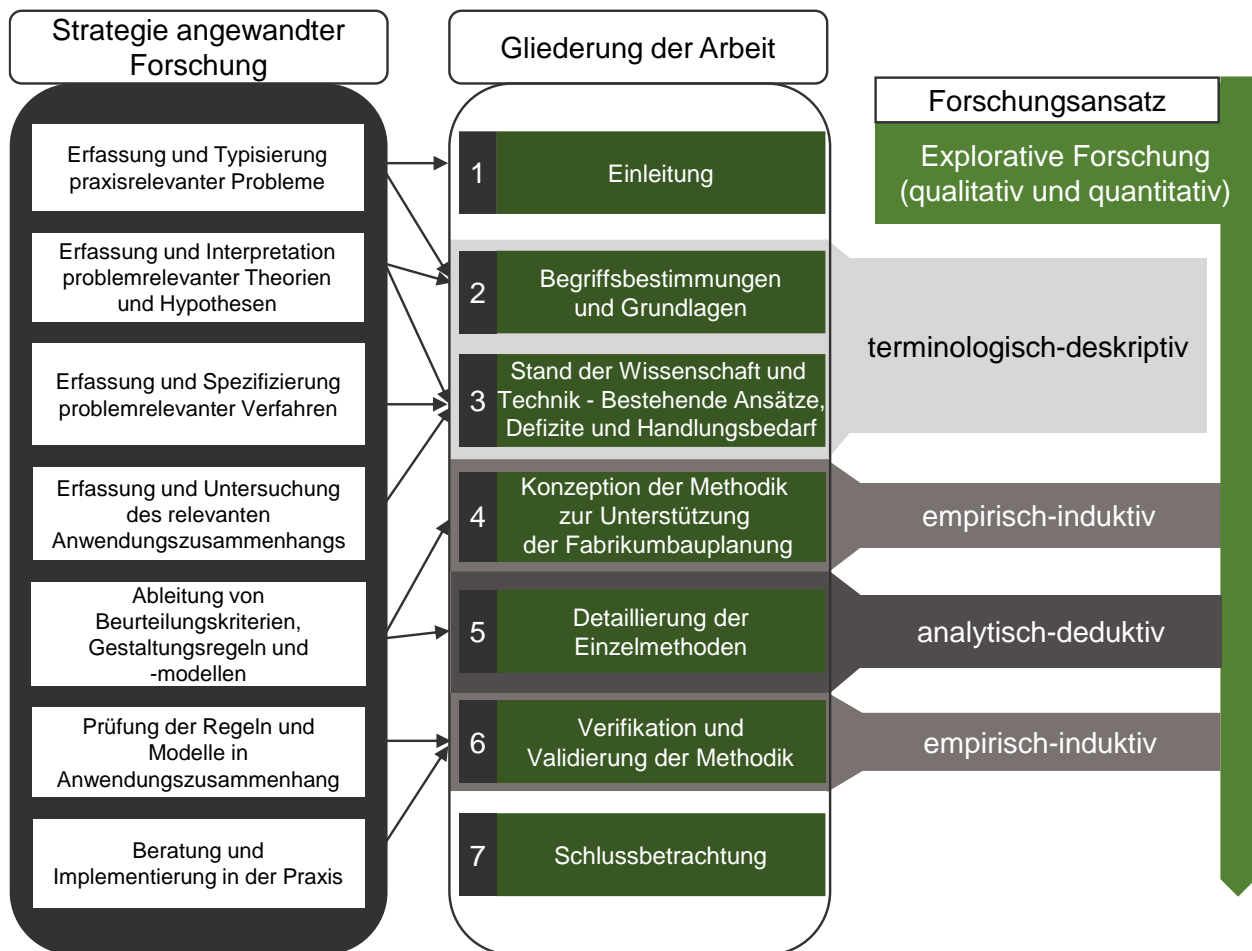


Abb. 4: Aufbau der Arbeit und forschungsmethodologische Vorgehensweise in Anlehnung an [Ulrich & Hill 1976a, S. 348], [Ulrich 1984, S. 193]

Im ersten Kapitel erfolgt mit der Ausgangssituation, Problemstellung, Zielsetzung, der verwendeten Forschungskonzeption sowie dem Aufbau der Arbeit eine Einordnung und Skizzierung der Grundstruktur der Arbeit. Die Problemstellung benennt die Forschungslücke, die anschließend in der Zielsetzung der Arbeit durch eine handlungsleitende Forschungsfrage sowie in vier untergeordneten Forschungsfragen adressiert wird. Das zweite Kapitel veranschaulicht die Grundlagen und Begriffsbestimmungen der Fabrik- und Industriebauplanung des produzierenden Gewerbes, was den Gegenstandsbereich der Forschungsarbeit darstellt. Bestehende, problemrelevante Ansätze werden in Kapitel 3 analysiert. Am Ende des dritten Kapitels werden aus den bestehenden wissenschaftlichen Ansätzen Defizite identifiziert, die den Handlungsbedarf begründen. Die Forschungslücke wird in Kapitel 3 als Differenz zwischen der handlungsleitenden Forschungsfrage und dem Stand der Wissenschaft und Technik herausgearbeitet. Somit bilden Kapitel 2 und Kapitel 3 den terminologisch-deskriptiven Teil der vorliegenden Arbeit (Abb. 4), indem das Begriffssystem und dessen Anwendung auf das Forschungsobjekt Fabrikgebäude ausgearbeitet wird. In Kapitel 4 folgt die Ableitung von Anforderungen auf Basis der vorher identifizierten Defizite, welche die Konzeption der Methodik für die Unterstützung der Fabrikumbauplanung begründen.

Dazu werden die abgeleiteten Anforderungen an die Methodik zusammengefasst und bei der Konzeption zur Schließung der Forschungslücke berücksichtigt. Auf der Grundlage der entwickelten Konzeption werden in Kapitel 5 die einzelnen Methoden analytisch-deduktiv detailliert herausgearbeitet (Abb. 4). Die Verifikation und Validierung der Methodik erfolgt in Kapitel 6 anhand von Experteninterviews, Fallbeispielen und Fallstudien. In den Fallstudien werden Ex-Post-Betrachtungen durchgeführt. Bei der Validierung wird geprüft, ob die in Kapitel 4 gestellten Anforderungen erfüllt und in welchem Maß die Zielstellung der Forschung (basierend auf den Forschungsfragen) sowie die Praxistauglichkeit erreicht werden. Abschließend wird in Kapitel 7 ein Ausblick auf den sich abzeichnenden, weiteren Forschungsbedarf gegeben.





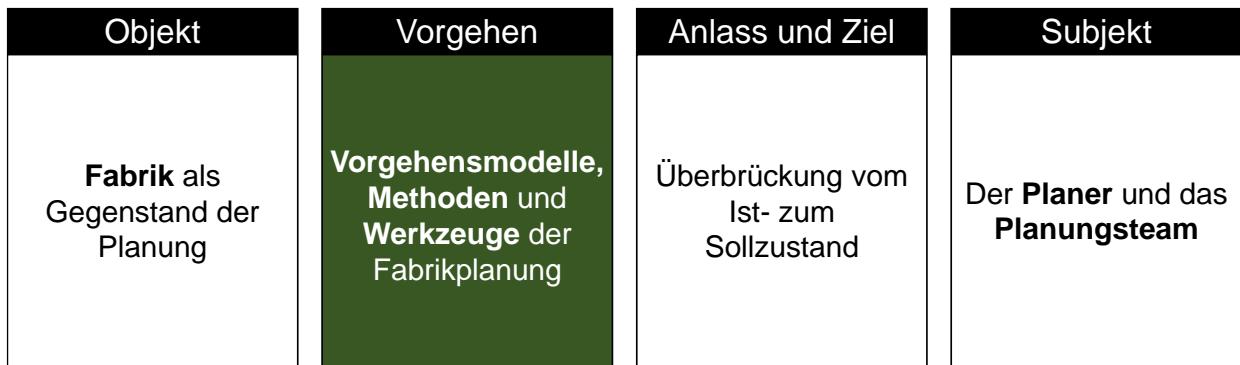
## **2      Begriffsbestimmungen und Grundlagen**

In diesem Kapitel werden in einem ersten Schritt die wesentlichen Begriffe und Grundlagen der Fabrikplanung (Kapitel 2.1) abgehandelt. Im zweiten Schritt erfolgt die Erläuterung der Begriffsdefinitionen und der Grundlagen zur Industriebauplanung (Kapitel 2.2). Dabei wird ergänzend die vorliegende Arbeit eingeordnet.

### **2.1      Grundlagen der Fabrikplanung**

Als Teil der langfristigen Unternehmensplanung, die als übergeordneter Rahmen vorgegeben ist, trägt die Fabrikplanung zur Erreichung der Unternehmensziele bei [Zürn 2010, S. 35]. Daher werden die Ziele der Fabrikplanung aus den Zielen der Unternehmensplanung abgeleitet. Die umfassende Planung von Produktionssystemen wird unter dem Terminus „Fabrikplanung“ diskutiert. Zur Strukturierung der Fabrikplanung dient die Fabrikplanungsontologie (Abb. 5) anhand der vier Domänen: Objekt, Vorgehen, Anlass und Ziel sowie dem Subjekt [Burggräf 2012, S. 14 f.]. Die Fabrik stellt das Objekt der Fabrikplanung dar. Das Vorgehen der Fabrikplanung findet auf der Grundlage von fabrikplanungsspezifischen Vorgehensmodellen und Methoden statt. Konkrete technische Werkzeuge, wie Softwaretools [Schindler 2019, S. 37], können dabei die Durchführung der gesamten Fabrikplanung oder einzelner Planungsaufgaben unterstützen [Bergholz 2005, S. 56]. Die Abweichung des Ist-Zustandes der Fabrik von einem aktuell sich ergebenden Soll-Zustand gibt in der Regel den Anlass zu Umplanungen. Das Ziel einer Umplanung ist somit das Erreichen des angestrebten Soll-Zustands einer Fabrik. Die Fabrikplaner bzw. das Fabrikplanungsteam stellen das Subjekt dar [Burggräf 2012, S. 14], das den Planungsanlass identifiziert, die Ziele der Fabrikplanung definiert und das gewählte Vorgehen anwendet.

Der Detaillierungsgrad in der Fabrikplanung variiert je nach Planungsobjekt. Das häufigste Planungsobjekt ist die einzelne Fabrik [Harms 2004, S. 7]. Die ganzheitliche Planung eines Objektes oder der gesamten Fabrik in den unterschiedlichen Lebenszyklusphasen (Abb. 2) wird in den Prozessen der Fabrikplanung durchgeführt.



 In der vorliegenden Arbeit fokussierte Domäne

Abb. 5: Domänen der Fabrikplanungsontologie in Anlehnung an [Burggräf 2012, S. 15]

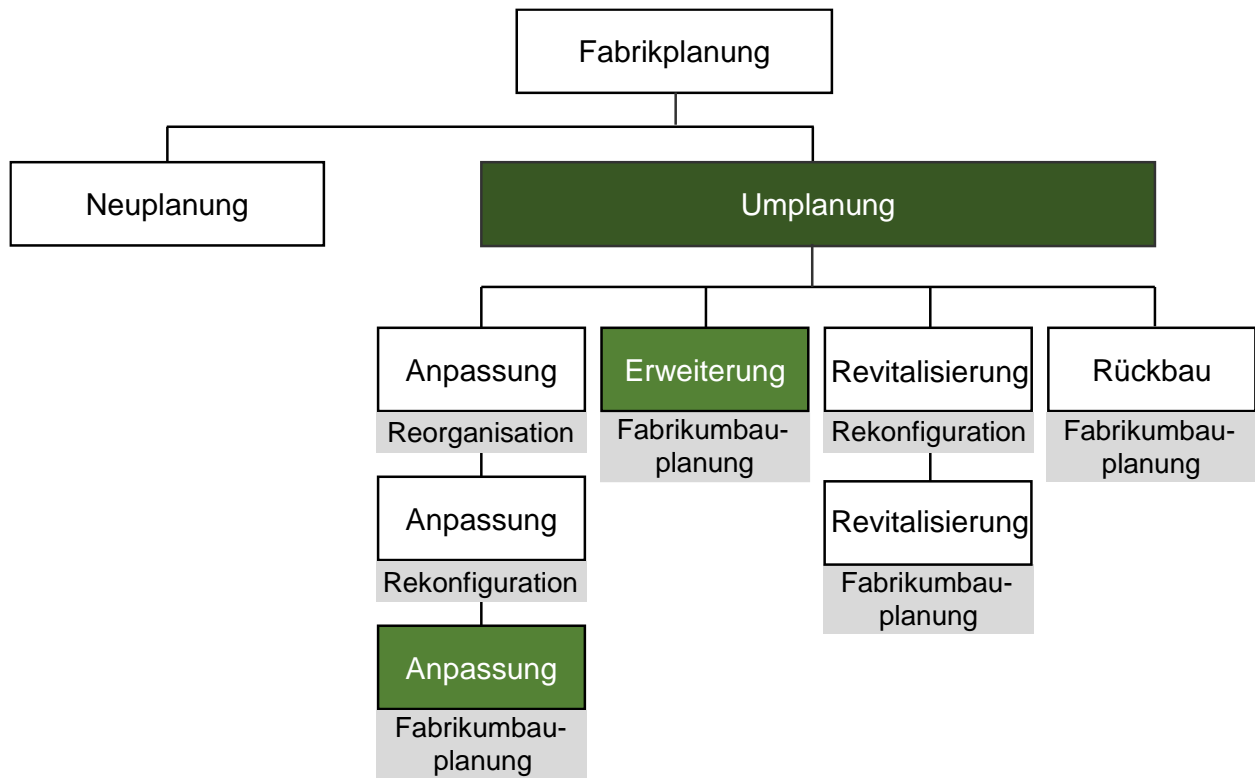
Für den Begriff der Fabrikplanung finden sich in der Literatur zahlreiche unterschiedliche Definitionen mit variierendem Schwerpunkt [Kettner et al. 1984, S. 3], [Schmigalla 1995, S. 71], [Grundig 2018, S. 11]. Den Begriff der Fabrikplanung konsolidiert der VDI-GPL-Fachausschuss (VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik e.V.) Fabrikplanung mit der VDI-Richtlinie 5200 Blatt 1 und konkretisiert die entsprechenden Aufgaben des Planungsprozesses:

**Fabrikplanung:** „Systematischer, zielorientierter, in aufeinander aufbauende Phasen strukturierter und unter Zuhilfenahme von Methoden und Werkzeugen durchgeführter Prozess zur Planung einer Fabrik von der Zielfestlegung bis zum Hochlauf der Produktion“ [VDI 5200-1 2011, S. 3].

Werden die Planungsfälle der Fabrikplanung betrachtet, können - abhängig von Ziel und Aufgabenstellung - die Fabrikplanungsprojekte in zwei Grundfälle (Abb. 6) unterschieden werden: Neuplanung und Umplanung [Grundig 2018, 18 f.].

Die Neuplanung stellt den klassischen Fall der Fabrikplanung dar. Dabei wird eine Fabrik auf einem unbebauten Grundstück ohne vorhandene Strukturen geplant und gebaut [Grundig 2018, S. 18]. Der durch die Globalisierung stark gestiegene Veränderungsdruck auf Fabriken und die Flächenknappheit bewirkt, dass der Planungsfall der **Umplanung** heutzutage deutlich häufiger zum Tragen kommt als die Neuplanung von Fabriken [Hennersdorf 2011, S. 34], [Michniewicz et al. 2017, S. 582], [Krunke 2017, S. 19].

Ein in der Literatur verwendeter Terminus für die Beschreibung von Umgebungsbedingungen bei einer Umplanung ist der Begriff „Brownfield“ [Nafors 2019, S. 10]. Bei der Anpassung (Abb. 6) bestehender Fabriken, die einen fokussierten Planungsfall in der vorliegenden Arbeit darstellt, müssen bestehende Strukturen an neue Fabrikziele [Bussemer et al. 2018, S. 240], wie etwa die Einführung eines neuen Produktes, angepasst werden.



In der vorliegenden Arbeit fokussierter Grundplanungsfall

In der vorliegenden Arbeit fokussierter untergeordneter Planungsfall

Abb. 6: Planungsfälle der Fabrikplanung in Anlehnung an [Grundig 2018, S. 17–19]

Zwar werden bei Anpassungen der Fabrikstruktur Planungsaufgaben wie die Standortermittlung oder Erstellung des Generalbebauungsplans nicht mehr durchgeführt, da diese bei bestehenden Fabriken bereits feststehen, dafür ist eine hohe Anzahl an bestehenden Restriktionen zu beachten [Graefenstein 2019, S. 25]. Ein weiterer, der Umplanung zuzuordnender Planungsfall ist die Erweiterung einer Fabrik (Abb. 6). Ein Beispiel hierfür ist der Anbau bzw. Ausbau eines Fabrikgebäudes aufgrund von gesteigener Nachfrage und der somit notwendigen Erweiterung der Produktionskapazität. Den gegenteiligen Umplanungsfall stellt der Rückbau einer Fabrik dar. Je nach Umfang des Umsatzrückgangs kann ein Fabrikgebäude bzw. Standort reduziert oder komplett rückgebaut werden. Der letzte Planungsfall der Umplanung ist die Revitalisierung einer Fabrik (Abb. 6). Hier werden Sanierungsarbeiten in bereits stillgelegten Fabriken durchgeführt, um dem Fabrikgebäude eine neue industrielle Nutzung zuführen zu können [Schenk et al. 2014, S. 164].

Der der Fabrikumplanung untergeordnete Planungsfall der Anpassung kann unterschiedliche Ausmaße annehmen (Abb. 6). Die Reorganisation stellt die einfachste Form der Anpassung dar und drückt sich bspw. durch eine geringfügige Layoutveränderung aus [Lübkemann & Nyhuis 2016, S. 7]. Eine Anpassung des Produktionssystems, bei dem die Struktur, Funktionalität, Kapazität und Technologie durch Ersetzen, Ergänzen oder Entfernen von Produktionsmodulen ohne

bauliche Veränderungen des Fabrikgebäudes stattfindet wird als Restrukturierung [Bussemer et al. 2018, S. 240], [Lübke mann & Nyhuis 2016, S. 7 f.] bzw. Rekonfiguration [Heisel & Stehle 2009, S. 453] bezeichnet. Sofern Veränderungen über das Produktionssystem hinausgehen und Umbaumaßnahmen am Fabrikgebäude vorgenommen werden, wird dies im Rahmen der vorliegenden Arbeit als **Fabrikumbauplanung** bezeichnet. Eine in der vorliegenden Arbeit fokussierte Fabrikumbauplanung liegt demzufolge vor, wenn bei einer Anpassung das Fabrikgebäude betroffen ist oder eine Erweiterung (Abb. 6) der Fabrik stattfindet. Fabrikumbauplanungen im Rahmen einer Revitalisierung oder eines Rückbaus werden wegen der Irrelevanz des aktuellen digitalen Fabrikgebäudemodells (Rückbau) oder nichtexistierenden Wirkbeziehungen zwischen Produktionssystem und Fabrikgebäude (Revitalisierung) nicht betrachtet.

Zur Identifikation notwendiger Anpassungen (Abb. 7) in der Erkenntnisphase können vor allem interne Wandlungstreiber durch das Monitoring von Kennzahlen beurteilt werden [Cisek 2005, S. 15], [Pohl 2013, S. 16]. In der Phase der Analyse und Bewertung erfolgt die Informationsbeschaffung und Informationsauswertung (Abb. 7). Die VDI 5200-1 (Fabrikplanung – Planungsvorgehen) bezeichnet diese Phase auch als Grundlagenermittlung [VDI 5200-1 2011, S. 11]. Bei Anpassungsprojekten werden in der Grundlagenermittlung die benötigten Maße und Informationen der bestehenden Fabrikstruktur erfasst und ausgewertet. Außerdem sollte während der Grundlagenermittlung analysiert werden, ob das bestehende Fabrikgebäude für die geplante Nutzung überhaupt geeignet ist [Wiendahl et al. 2014, S. 500].

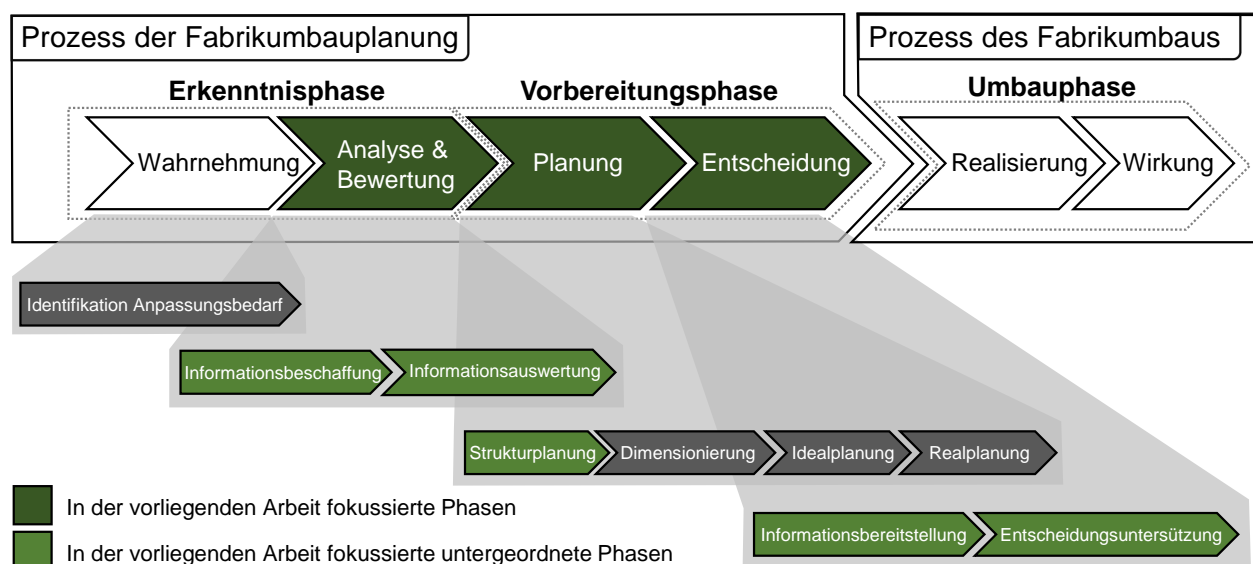


Abb. 7: Detaillierte Phasen des Prozesses der Fabrikumbauplanung sowie des Fabrikumbaus in Anlehnung an [Pawellek 2014, S. 165–188], [Delbrügger et al. 2017, S. 364]

Insbesondere bei der Informationsbeschaffung kommt es wegen den unvollständigen Planungsunterlagen des Gebäudes zu Verzögerungen [Zäh et al. 2004, S. 56], [Schindler 2019, S. 26]. Durch das Vorhalten von aktuellen Gebäudedaten, z.B. in Form eines digitalen Gebäudemodells

kann im Umbauprozess die Phase der Informationsbeschaffung verkürzt werden [Landherr et al. 2013, S. 183]. Aus den ausgewerteten Ist-Daten wird eine Planungsgrundlage erstellt [Pawellek 2014, S. 167–169]. Bestandteil der Ist-Analyse (Informationsauswertung, Abb. 7) ist zudem die Identifikation von Auswirkungen von geplanten Veränderungen [Pawellek 2014, S. 343]. Darauf aufbauend kann mit der Umplanung begonnen werden. In der Vorbereitungsphase (Abb. 7) wird die Planung mit den Phasen Strukturplanung, Dimensionierung, Idealplanung und Realplanung durchgeführt [VDI 5200-1 2011, S. 12 f.]. Anzumerken ist dabei, dass während des gesamten Umbauprozesses Fachpersonal unterschiedlicher Disziplinen einbezogen werden muss [Lenz 2020, S. 2]. Wird es bei einer Anpassung des Produktionssystems notwendig, das Fabrikgebäude umzubauen, kann das digitale Gebäudemodell als Grundlage für die Koordination und Informationsbereitstellung dienen [Näser & Wickenhagen 2018, S. 245 f.]. Die abschließende Realisierung der Umbauphase (Abb. 7) soll eine Rückkehr zum optimalen Betriebspunkt der Fabrik bewirken. Die VDI 5200-1 legt die Phasen für die Realisierung fest: Realisierungsvorbereitung und Realisierungsüberwachung [VDI 5200-1 2011, S. 8]. Die Realisierungsüberwachung umfasst die Koordination und Dokumentation der (Um)Bauphase einer Fabrik. Die Abschlussdokumentation beinhaltet alle wesentlichen Informationen, die für den laufenden Fabrikbetrieb notwendig sind. Insbesondere bei anstehenden Umbaumaßnahmen sind die Fabrikplaner auf die Abschlussdokumentation angewiesen, um eine Grundlagenermittlung durchführen zu können [Schindler 2019, S. 14]. Bei nicht vorliegender oder nicht aktueller Dokumentation des Fabrikgebäudes ist dieser zusätzlich erforderliche Zeitaufwand hinsichtlich einer erforderlichen Verkürzung der Planungszeit kritisch zu bewerten [Krunke 2017, S. 22].

Der Forderung folgend, dass der von den Veränderungstreibern ausgelöste Umbauprozess möglichst effizient und effektiv [Delbrügger et al. 2017, S. 365] ablaufen soll, empfiehlt es sich, entsprechende Konzepte zu betrachten. Zur Verkürzung von Prozessen, wie dem Prozess der Fabrikumbauplanung, lassen sich sieben Ansätze identifizieren: Eliminierung, Parallelisierung, Integration, Automation, Standardisierung, Abbau von Schnittstellen und das Auslagern von Prozessen [Best & Weth 2010, S. 136–138], [Schlick et al. 2018, S. 661–663]. In der Fabrikplanung lässt sich vorrangig die zunehmende Parallelisierung von Planungsprozessen beobachten, um die notwendige Zeitreduzierung zu generieren [Schindler 2019, S. 42]. Konkrete Ansätze der Parallelisierung der Planung bieten das Concurrent Engineering bzw. Simultaneous Engineering [Westkämper 2006, S. 377], die integrative bzw. partizipative Fabrikplanung [Zäh et al. 2004, S. 55], agile Ansätze für die Fabrikplanung [VDI 4499-3 2016, S. 24], [Kampker et al. 2013, S. 345–347], [Dannapfel et al. 2019, S. 522] sowie die digitale Fabrik [VDI 4499-2 2011].

Durch die Betrachtung der Fabrik als System und der daraus resultierenden Fabrikplanung lässt sich die Veränderungsgeschwindigkeit aus der Relation zwischen Anzahl an Umbaumaßnahmen

und der notwendigen Reaktionszeit, diese zu planen und zu realisieren, beschreiben [Hartkopf 2013, S. 9]:

$$V = \frac{A}{R_t}$$

Mit:

V= Veränderungsgeschwindigkeit

A= Anzahl an durchführbaren Anpassungs- bzw. Umbaumaßnahmen

R<sub>t</sub>= notwendige Reaktionszeit zum Planen und Realisieren von Anpassungs- bzw. Umbaumaßnahmen

Die Veränderungsgeschwindigkeit kann somit durch die in der notwendigen Reaktionszeit durchführbare Anzahl an Umbaumaßnahmen definiert werden. Die Geschwindigkeit zur Umsetzung von Umbaumaßnahmen hängt daher maßgeblich von der Reaktionsfähigkeit bzw. Reaktionszeit ab, mit der Umbauprozesse geplant und realisiert werden (Abb. 8).

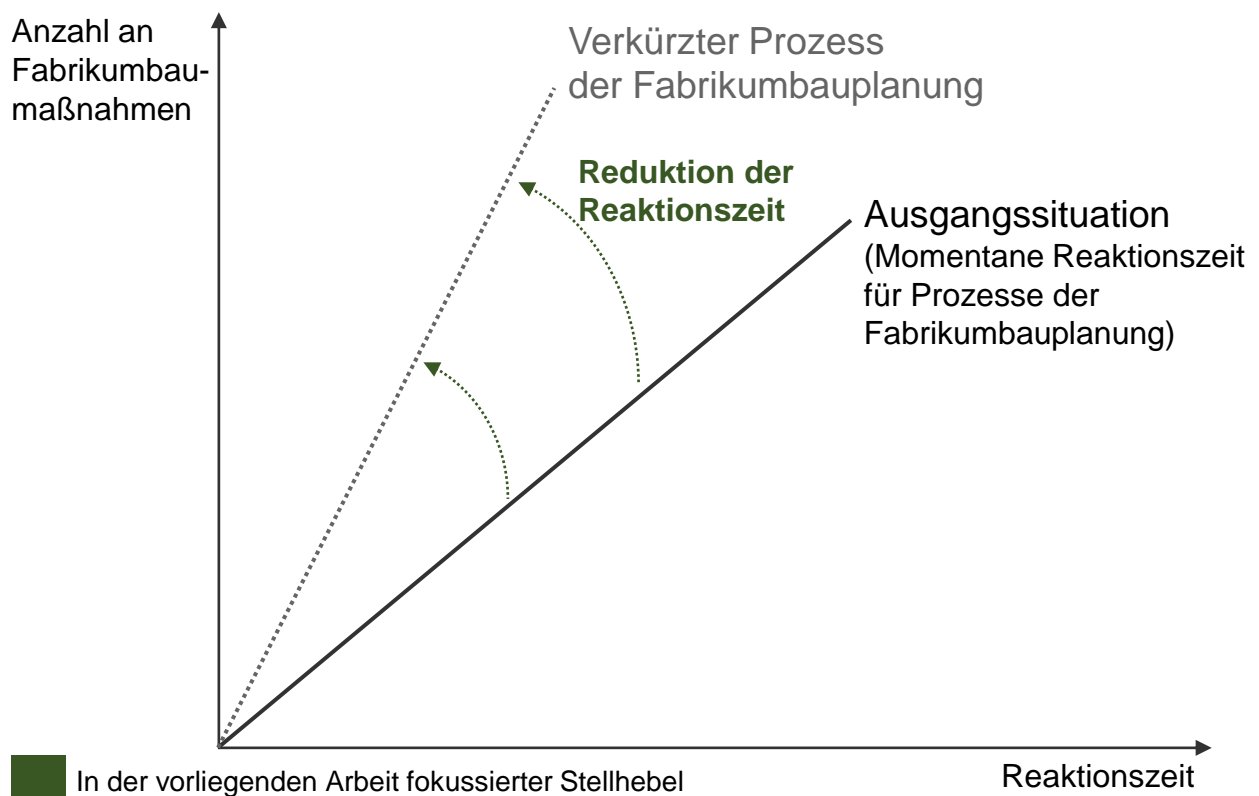


Abb. 8: Darstellung von Auswirkungen der Erhöhung der Veränderungsgeschwindigkeit in Anlehnung an [Hartkopf 2013, S. 10]

Um die Veränderungsfähigkeit des soziotechnischen Systems der Fabrik zu erhöhen, leitet [Hartkopf 2013, S. 9] zwei elementare Stellhebel ab (Abb. 8):

- Die Erhöhung der Veränderungsgeschwindigkeit durch Reduktion der notwendigen Reaktionszeit zum Planen und Umsetzen der Anpassungsmaßnahmen (Abb. 8).
- Die Erhöhung der Anzahl an Anpassungsmaßnahmen in der zur Verfügung stehenden Reaktionszeit durch frühzeitiges Vorausplanen und rechtzeitiges Agieren.

Das System Fabrik [Rönnecke 2009, S. 30], das aus verschiedenen Fabrikobjekten besteht, lässt sich in die Subsysteme der Fabrikebenen und Fabrikfelder unterteilen [Heger 2006, S. 9 f.], [VDI 5200-1 2011, S. 7]. Übergeordnete Fabrikebenen umfassen dabei alle Elemente untergeordneter Ebenen. Als Fabrikebenen existieren das Werk, das Fabrikgebäude, der Fabrikbereich und die Arbeitsstation [Heger 2006, S. 72]. Die Gestaltungsfelder, die den Fabrikaufbau horizontal unterteilen, lassen sich in Technik, Organisation und Fläche bzw. Raum gliedern [Wirth et al. 1999, S. 39]. Unter den **Fabrikobjekten** sind Objekte materieller und immaterieller Art zu verstehen [Heger 2006, S. 9], die im Rahmen der Fabrikplanung gestaltet bzw. beplant werden können (Abb. 9). Dem Maß dieser möglichen Wandlungsfähigkeit der einzelnen Fabrikobjekte widmet sich Heger [Heger 2006] mit den entwickelten Wandlungspotenzialmerkmalen und Merkmalskalen [Heger 2006, S. 83–101]. Die Fabrikobjekte werden zunächst auf der obersten Stufe, der 1. Ordnung benannt, z.B. Bauform (Abb. 9). Untergeordnet werden dann Teilbereiche in der 2. Ordnung näher spezifiziert [Heger 2006, S. 72 f.]. Beispielsweise wird die Bauform (1. Ordnung) in das Schnittprofil, dem Grundriss und dem Verknüpfungsprinzip in der 2. Ordnung unterteilt (Abb. 9). Eine ausführliche Auflistung der Fabrikobjekte 1. und 2. Ordnung findet sich bei [Heger 2006, S. 155–163]. Die Fabrikobjekte (1. Ordnung) lassen sich durch die Gegenüberstellung der Fabrikebenen und Fabrikfelder zuordnen. Die Fabrikobjekte, die den vertikalen Fabrikebenen und horizontalen Gestaltungsfeldern zugeordnet sind, können zudem in Fabrikobjekte der Produktion und Fabrikobjekte zugehörig zum Industriebau unterteilt werden (Abb. 9). Abgeleitet von den Zielen einer Fabrik, die in Formalziele und Sachziele zu unterscheiden sind, gehört die Wirtschaftlichkeit einer Fabrik zu den wesentlichen Zielgrößen [Burggräf 2012, S. 25] eines produzierenden Unternehmens. Die Fabrikziele sollen durch die Nutzung und dem Zusammenspiel der Fabrikobjekte mit dem Personal, dem Produktionsenabler, erreicht werden [Wulf 2011, S. 11]. Die primäre Funktion einer Fabrik findet folglich in den Fabrikobjekten der Produktion (Abb. 9) statt. Deshalb wird in der vorliegenden Arbeit davon ausgegangen, dass notwendige Änderungen immer von den Fabrikobjekten der Produktion ausgehen und direkte bzw. indirekte Auswirkung auf die Fabrikobjekte des Industriebaus haben.

Der Änderungseinfluss der Fabrikobjekte der Produktion wird in Abb. 9 in Form von Pfeilen in Richtung der Fabrikobjekte des Industriebaus dargestellt. Das Prinzip der Verzahnung der materiellen und immateriellen Fabrikobjekte, sowohl aus dem Produktions- als auch Gebäudebereich, wird als **Fabrikstruktur** bezeichnet [Harms 2004, S. 12]. Die Fabrikstruktur repräsentiert beste-



hende Fabrikobjekte und richtet diese idealtypisch bspw. für optimale Material- oder Kommunikationsflüsse aus, ohne räumliche Restriktionen miteinzubeziehen [Wulf 2011, S. 83]. Zu den Beziehungen bzw. Flüssen innerhalb einer Fabrik zählen der Prozess-, Material-, Informations-, Kommunikations-, Personal-, Energie- und Medienfluss [Harms 2004, S. 12]. Das Fabriklayout determiniert, aufbauend auf der Fabrikstruktur, das räumliche Arrangement der Fabrikobjekte [Wulf 2011, S. 81]. Bei Umplanungen sind die Restriktionen der bestehenden Raum- und Gebäudegestaltung zu berücksichtigen [Harms 2004, S. 50]. Das industrielle Ziel ist es dabei, die einzelnen Beziehungen bzw. Flüsse möglichst effizient zu gestalten. Die Veränderungsfähigkeit der Fabrikstruktur hängt stark vom system- und strukturimmanenten Veränderungspotenzial einer Fabrik und den zugehörigen Fabrikobjekten ab [Hawer 2020, S. 14].

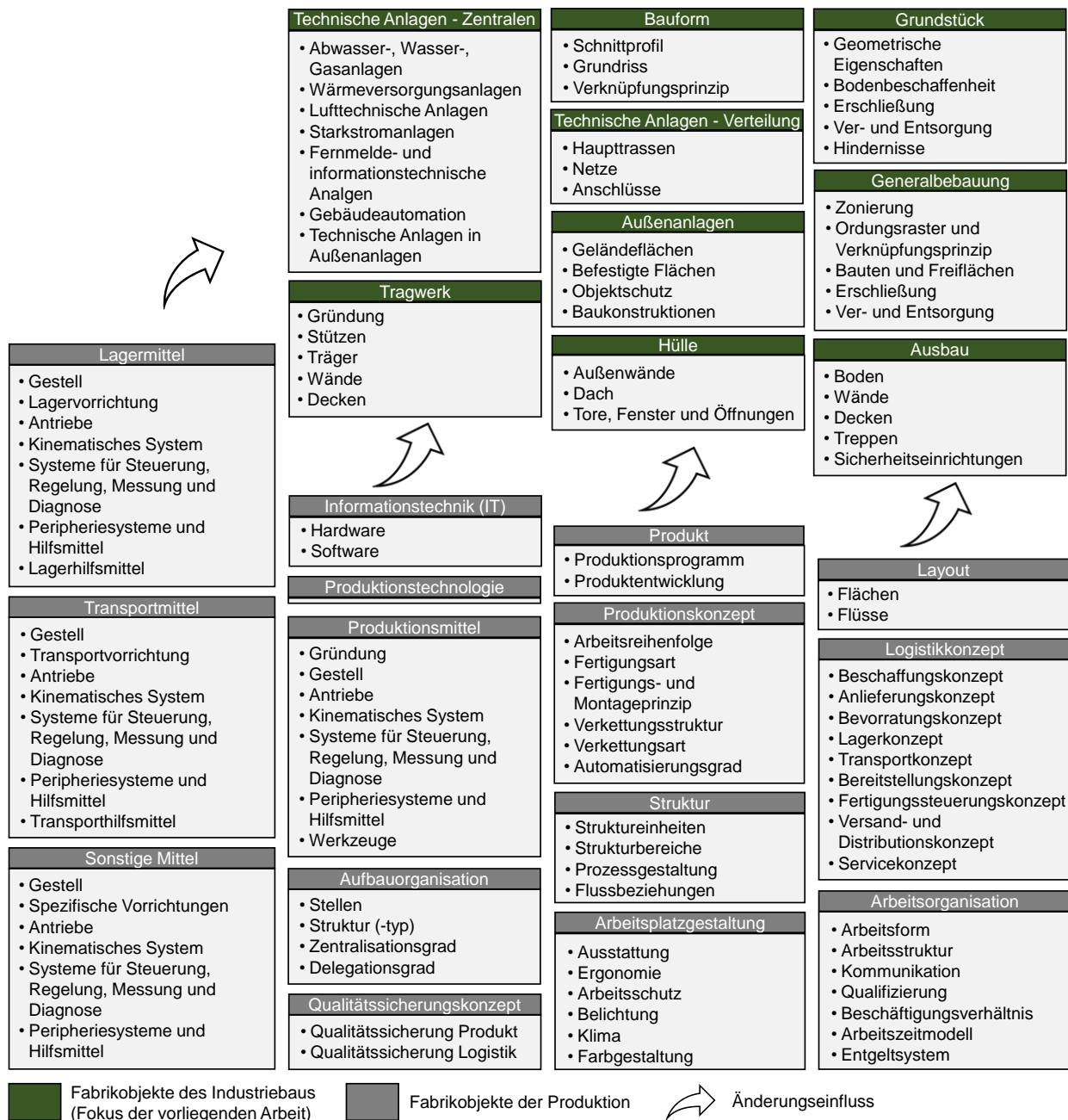


Abb. 9: Fabrikobjekte des Industriebaus und der Produktion nach [Heger 2006, S. 155–163]

## 2.2 Grundlagen der Industriebauplanung

Die Gestaltung von Industriebauten unterliegt, wie in den vorherigen Kapiteln bereits angedeutet, vielfältigen Anforderungen aus den Produktionsprozessen und dem damit verbundenem Layout, den Materialflüssen sowie dem Logistikkonzept. Doch auch nicht-produktionsspezifische Aspekte wie Grundstückseigenschaften, Erscheinungsbild, Energieeffizienz und Anforderungen an die Wandlungsfähigkeit haben Einfluss auf die Planung des Fabrikgebäudes.

Um komplexe Gebäude wie Fabriken zu planen, werden heutzutage digitale Planungswerkzeuge in der Baubranche verwendet. Seit der 1974 aufgekommenen Idee, digitale Modelle mit Informationen zu verknüpfen [Eastman et al. 1974, S. 13–16] bis zur erstmaligen Verwendung des Begriffs Building Information Modeling (BIM) 1992 [van Nederveen & Tolman 1992, S. 215], hat sich die auf digitale Gebäudemodelle basierende Arbeitsmethode BIM im Bauwesen entwickelt. Die jahrelange Einführung und Weiterentwicklung von BIM hat eine Vielzahl leicht variierender und mit unterschiedlichen Schwerpunkten versehenen Definitionen hervorgebracht [Latiffi et al. 2014, S. 626], [DIN EN ISO 19650-1 2019, S. 13], [DIN EN ISO 29481-1 2018, S. 7], [Bradley et al. 2016, S. 140 f.], [NIBS 2012, S. 12]. Um die mit dem Begriff BIM vielschichtigen Inhalte zu konsolidieren, wurde für die vorliegende Arbeit nachfolgende Definition entwickelt und aus bestehenden, oben genannten, Definitionen zusammengesetzt:

**Building Information Modeling:** „BIM ist eine Methode im Bauwesen, die das Erzeugen und Verwalten von digitalen Gebäudemodellen durch Software ermöglicht und zur Unterstützung von Planungs-, Bau-, und Betriebsprozessen als zuverlässige Entscheidungsgrundlage dient. Ein digitales Gebäudemodell enthält dafür alle Informationen zu physikalischen und funktionalen Eigenschaften eines Bauwerks. Die Gebäudemodelle stellen während des gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes eine Informationsdatenbank rund um das Bauwerk dar. Eine grundlegende Voraussetzung von BIM ist die Zusammenarbeit der am Lebenszyklus einer baulichen Anlage Beteiligten, um die gemeinsam zur Verfügung stehenden Gebäudeinformationen aus der jeweiligen Perspektive, zu erstellen, auszuwerten, zu ändern oder zu aktualisieren.“

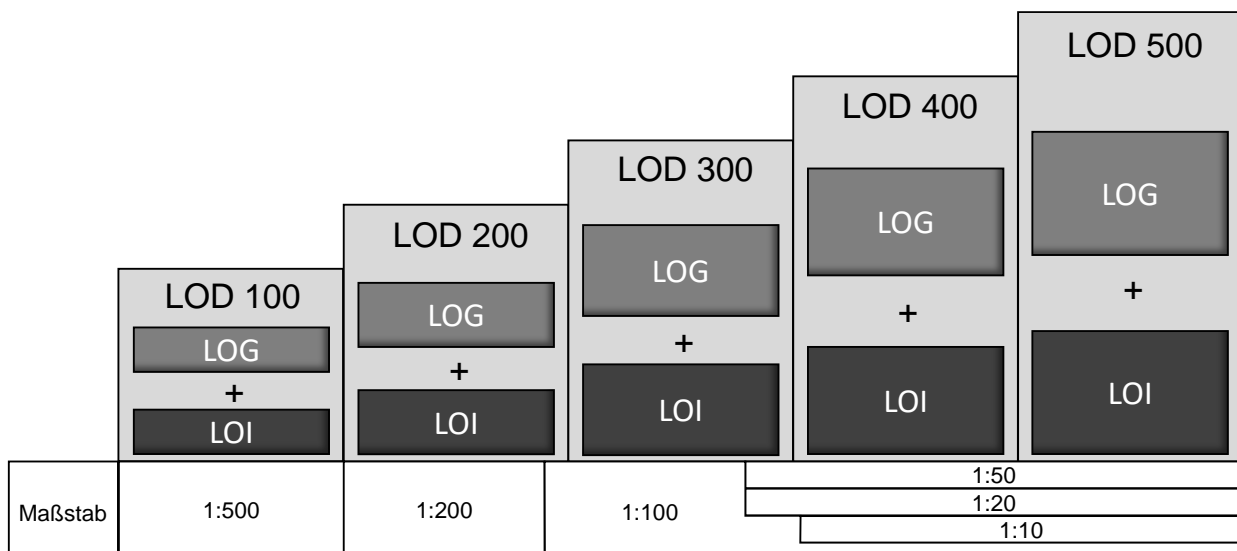
Für ein BIM-Modell wird der Reife- bzw. Modellfertigstellungsgrad als Level of Development (LOD) bezeichnet. Der LOD kann sowohl von der jeweiligen Disziplin mit entsprechenden Fachmodellen und deren Fertigstellungsgraden (FGSG), wie der Schalungs- und Gerüsttechnik [VDI 2552-11.3 2020, S. 3–11] oder der Schlitz- und Durchbruchsplanung [VDI 2552-11.2 2020, S. 9 f.], als auch von der Leistungsphase abhängig sein. Die Definition von LODs erfolgt jedoch nicht für ein gesamtes BIM-Modell, sondern objektbezogen. Ein digitales Gebäudemodell kann somit Objekte unterschiedlicher Reife- bzw. Fertigstellungsgrade besitzen. In Deutschland gibt es keine übereinstimmende Definition des Begriffs LOD in der Literatur [LOD Spec 2019 2019, S. 245], [Latiffi et al. 2015, S. 933 f.], [Alshorafa & Ergen 2019, S. 419]. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird der Begriff Level of Development für ein einheitliches Verständnis und basierend auf bestehenden und oben genannten Definitionen in der Literatur folgendermaßen definiert:

**Level of Development (LOD):** „Der LOD ist der Entwicklungsgrad der dargestellten Geometrie eines Modellbauteilelements und der damit verknüpften Information. Er wird somit als Oberbegriff

für die Genauigkeit der Geometrie als auch für den semantischen Informationsgehalt von Modellbauteilelementen verstanden. Mit steigendem Entwicklungsgrad von Modellbauteilelementen steigt der Grad an Ausarbeitung und Verlässlichkeit der Modellinhalte.“

Die in der Definition hervorgehobene Aufteilung des LOD in die Abstufung der Geometrie (Level of Geometry, LOG) und Information (Level of Information, LOI) durch sogenannte Attribute von Bauteilen im BIM-Modell, konkretisieren den jeweiligen Entwicklungsgrad (Abb. 10). Als Attribute werden die in den BIM-Objekten hinterlegten Informationen (z.B.: Baustoffe, Brandverhalten usw.) bezeichnet.

Der LOG (Abb. 10) gibt an, wie viel Detail im Modellobjekt enthalten ist [VDI 2552-1 2020, S. 54]. Durch den LOI wird die dem Modellobjekt angehängte Informationsdichte beschrieben [VDI 2552-1 2020, S. 55]. Zusammengefasst wird der LOG und LOI somit durch den LOD [VDI 2552-1 2020, S. 41]. Der LOD wird in die Klassen 100 - 500 (Abb. 10) abgestuft. Die Abstufung unterstützt Planer dabei, die Verwendbarkeit von Gebäudemodellen einzuschätzen sowie die Grenzen niedriger LOD-Klassen zu berücksichtigen [Latiffi et al. 2015, S. 933]. Die LOD-Klassen sind aufsteigend zu verstehen, sodass bspw. in einem Gebäudemodell mit dem LOD 100 (Abb. 10) nur Modellelemente enthalten sind, die sehr vereinfacht in einem groben Maßstab [VDI 2552-4 2020, S. 26], dargestellt werden.



LOD: Level of Development    LOG: Level of Geometry    LOI: Level of Information

Abb. 10: Zusammenhang von LOG, LOI und LOD in Anlehnung an [VDI 2552 - 1, S. 40]

Im LOD 500 repräsentiert das Modellobjekt das reale Bauteil hinsichtlich herstellereinspezifischer Geometrie und Informationen [VDI 2552-1 2020, S. 54 f.]. Teilweise wird in der Literatur auch der LOD 600 genannt, der Informationen beinhaltet, die für den Betrieb und dem Facility Management eines Gebäudes relevant sind [VDI 2552-4 2020, S. 13]. Für Umbauten von Gebäuden wird der

LOD 400 vorgeschlagen, um alle erforderlichen geometrischen und alphanumerischen Informationen bereitstellen zu können [VDI 2552-4 2020, S. 13]. Anders als bei einem Neubau kann bei einem Umbau bereits in den frühen Leistungsphasen der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI) ein höherer LOD vorliegen als in Abb. 10 dargestellt. Der jeweils notwendige LOD für eine Umbaumaßnahme innerhalb einer Fabrik kann jedoch nicht pauschal vorgegeben werden, sondern richtet sich immer nach den spezifischen Anforderungen und Zielen eines Umbaus. In der Literatur finden sich auch integrative Ansätze, die LOD Definitionen spezifisch für Fabrikgebäude ausarbeiten [Burggräf et al. 2020, S. 477]. Diese Ansätze werden bisher jedoch kaum genutzt und befinden sich noch in der Konzeptphase.

Die Beteiligten eines Planungsteams für die Industriebauplanung im Rahmen der Fabrikplanung setzen sich aus fachtechnisch heterogenen Planern zusammen. Diese Zusammensetzung kann je nach Planungsanlass oder Umfang und der damit verbundenen Komplexität variieren. Eine Auswahl der in der Fabrikplanung möglichen Planer findet sich in Abb. 11. Kategorisiert werden die beteiligten Planer in Auftraggeber, Management, Planung und Ausführung. Zu erwähnen ist, dass die klassischen Planungsbeteiligten der Produktions- und Industriebauplanung in Abb. 11 um Fachplaner aus der digitalen 3D-Gebäudeplanung ergänzt werden. Der Auftraggeber (Bauherr) gibt die Planungsziele der Fabrikumbauplanung vor. Für den Gebäudebereich wird dieser vom BIM-Informationsmanager bei der Vorgabe und Überwachung der von den Planern zu liefernden Informationsanforderungen des gesamten Projekts unterstützt [Davies et al. 2017, S. 190].

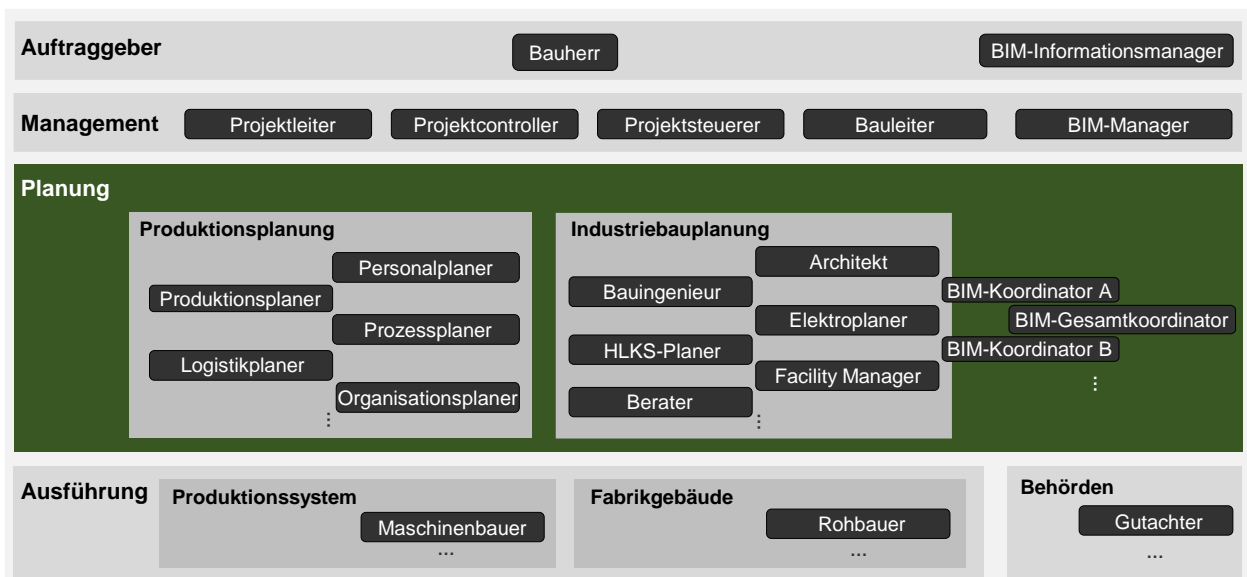


Abb. 11: Planungsbeteiligte einer Fabrikplanung

Im Management befinden sich je nach Umfang der Fabrikumbauplanung die Projektleitung, das Projektcontrolling, die Projektsteuerung und für den Baubereich die Bauleitung und der ergänzende BIM-Manager. Auf der Ebene des Managements ist der BIM-Manager für die Entwicklung und Lieferung des BIM-Ausführungsplans sowie für die Erstellung der BIM-Protokolle des Projekts verantwortlich [Davies et al. 2017, S. 190]. In der Planungsebene treffen die Domänen der Fabrikplanung im engeren Sinne (Produktionsplanung) und der Industriebauplanung aufeinander. Beispielhaft für die Produktionsplanung sind in Abb. 11 die Personal-, Produktions-, Prozess-, Logistik- und Organisationsplaner aufgelistet. Für die Industriebauplanung werden neben dem Architekten und Bauingenieur auch Fachplaner, wie der HLKS-Planer (Heizung-Lüftung-Klima-Sanitär) genannt. Die beiden Aufzählungen sind nicht erschöpfend und können nach Bedarf erweitert werden. Die Planer aus der Produktions- und Industriebauplanung sind die BIM-Autoren für die jeweiligen Gewerke. Der in der Planungsebene angesiedelte BIM-Koordinator unterstützt die Zusammenführung von digitalen Gebäudemodellen und leitet interaktive Planungsbesprechungen, um die gemeinsame Arbeit an einem Modell zu koordinieren [Gustavsson 2018, S. 605 f.]. Für sehr umfangreiche Planungen wird zur Koordination der unterschiedlichen Gewerke zusätzlich ein BIM-Gesamtkoordinator eingesetzt. Der Einsatz von BIM-Modellen findet neben der Anwendung in der Planungsphase, geregelt durch die Leistungsphasen der HOAI, auch während der Ausführung und des Betriebs eines Gebäudes statt. Nach Abschluss der Planungsphase liegt ein BIM-Modell „As-planned“ vor (Abb. 12). Darauf folgt die Ausführung bzw. der Bau des Industriegebäudes. Aufgrund von auf der Baustelle unerwartet vorgefundenen Bedingungen kann es vorkommen, dass ursprünglich geplante Gebäudeelemente teilweise anders ausgeführt werden, um auf die Bedingungen vor Ort reagieren zu können. Das führt dazu, dass das BIM-Modell „As-planned“ vom BIM-Modell „As-built“ abweichen kann [Tuttas 2017, S. 1]. Dieser Diskrepanz widmen sich Forschungsansätze unter dem Stichwort „Baufortschrittskontrolle“ [Kim et al. 2013a, S. 75], [Tuttas et al. 2014, S. 341], [Tuttas et al. 2017, S. 3]. Weitaus weniger wissenschaftliche Veröffentlichungen beleuchten die Aktualisierung von BIM-Modellen bestehender Fabrikgebäude. Um jedoch auf von der Produktion induzierte Umbauten am Fabrikgebäude schnell reagieren zu können, sind aktuelle BIM-Modelle, sogenannte „As-maintained“ Modelle (Abb. 12) während der Betriebsphase, beispielsweise einer Fabrik, notwendig [Wiendahl et al. 2014, S. 587], [Blankenbach 2016, S. 3].

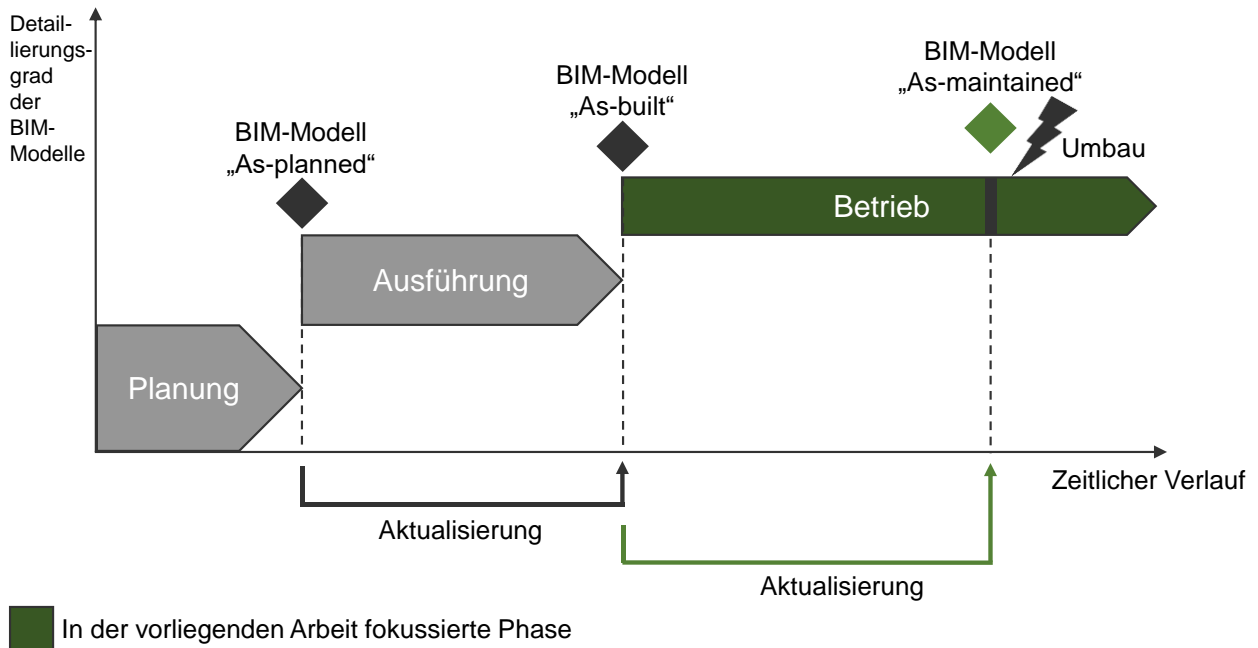


Abb. 12: Planungsstände und Einsatzphasen von BIM-Modellen

Die Aktualität von Datenelementen ist eine von vielen Daten- bzw. Informationsqualitätsdimensionen [Rohweder et al. 2018, S. 28]. In der Literatur finden sich unterschiedliche Ansätze, die Informationsqualitätsdimensionen aufzulisten und zu definieren [Wand & Wang 1996, S. 93], [Würthele 2003, S. 24], [Jung 2005, S. 123], [Rohweder et al. 2018, S. 28]. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird ausschließlich auf die Informationsqualitätsdimensionen Aktualität und Genauigkeit eingegangen, da diese direkten Bezug zur Zielstellung aufweisen.

Für digitale Gebäudemodelle stellt die Aktualität von Daten einen zentralen Faktor der Informationsqualität dar [Lenz 2020, S. 57]. Dass die Aktualität generell zu den wichtigsten Qualitätsdimensionen gehört, zeigen die Ergebnisse von verschiedenen Umfragen zu den Einflussgrößen der Datenqualität [Wand & Wang 1996, S. 92], [Würthele 2003, S. 124]. Die Aktualität zeigt dabei an, inwieweit ein Informationsobjekt im digitalen Gebäudemodell den Zustand des Realweltobjektes zu einem bestimmten Bezugszeitpunkt wiedergibt [Jung 2005, S. 111]. Teilweise wird in der Literatur vorgeschlagen die Aktualität von Daten mittels wahrscheinlichkeitstheoretischen Betrachtungen zu überprüfen [Heinrich & Klier 2018, S. 60]. In Hinblick auf digitale Gebäudemodelle stellt dies keine zweckmäßige Herangehensweise dar. Die Aktualität bedarf hier einer Überprüfung durch den Abgleich mit den Realobjekten. Die Überprüfung der Aktualität des digitalen Gebäudemodells ist durch den Einsatz von Bestandserfassungsmethoden teilweise bereits automatisiert möglich [Volk et al. 2014, S. 123], [Lenz 2020, S. 57]. In der vorliegenden Arbeit liegt der Fokus auf der Aktualität von Gebäudemolldaten zum Bezugszeitpunkt des Umbaufalles eines Fabrikgebäudes. Trotz der häufig genannten Unverzichtbarkeit der Aktualität von digitalen Gebäudemodellen [Donath 2008, S. 137], [Landherr et al. 2013, S. 183], [Pawellek 2014, S. 173], [Schindler 2019, S. 21], [Lenz 2020, S. 57], [Bartels 2020, S. 67], [Bolshakov et al. 2020, S. 6]

wird in der Praxis immer wieder eine Vernachlässigung der Aktualisierung von digitalen Gebäudemodellen oder Gebäudeplanunterlagen vorgefunden [Donath 2008, S. 133], [Wiendahl et al. 2014, S. 587], [Volk et al. 2014, S. 110], [Volk et al. 2015, S. 47], [Bartels 2020, S. 58]. Dies liegt nicht zuletzt an den bisher nicht vorliegenden Methoden zur Aktualisierung von digitalen Gebäudemodellen.

Im Kontext von digitalen Fabrikgebäudemodellen gibt die Informationsqualitätsdimension Genauigkeit an, in welchem Skalenniveau, dem LOD, ein Gebäudemodell vorliegt. In diesem Zusammenhang wird auf die DIN 18202 verwiesen, nach der im Bereich der Gebäudestruktur Toleranzen von  $\pm 30$  Millimetern auf Gebäudeabmessungen von 15 bis 30 Metern zulässig sind [DIN 18202 2019, S. 11]. Außerdem regelt die DIN 18710-1 für Ingenieurvermessungen die Standardabweichungen [DIN 18710-1 2010, S. 9 f.] mittlerer Genauigkeit (Klasse L3 und H3) mit 2 – 15 mm. Digitale Fabrikgebäudemodelle sollen mindestens eine Präzision, die sich in den genannten Toleranzen bewegt, liefern, um diese für die Planungsphasen eines Umbauprozesses einsetzen zu können.

Zu den weiteren Informationsqualitätsdimensionen wird auf die Literatur verwiesen [Lehner 2003, S. 136], [Rohweder et al. 2018, S. 38], [Rohweder et al. 2018, S. 26], [Gebauer & Windheuser 2018, S. 91], [Xinyu & Anna 2019, S. 3].

Neben den BIM-Modellen, die heutzutage noch vornehmlich in der Planungsphase von Gebäuden Anwendung finden, müssen Bestandsgebäude oftmals nachträglich erfasst werden. Abhängig vom erforderlichen LOD, dem verarbeitbaren Datenvolumen, der vorhandenen Verarbeitungszeitspanne, der Größe und Komplexität des Gebäudes, den verarbeitbaren Datenformaten und dem angestrebten Automatisierungsgrad der Aufnahme wird die Aufnahmemethode ausgewählt [Volk et al. 2014, S. 118]. Die in Abb. 13 aufgelisteten Bestandserfassungsmethoden von Bauwerken sind wesentliche Voraussetzung für Fabrikumbauplanungen und die Dokumentation für das Bauen im Bestand. Mit der voranschreitenden Etablierung der BIM-Methode in der Baubranche gewinnen somit digitale Ansätze zur Bestandserfassung für bestehende Gebäude kontinuierlich an Bedeutung [Blankenbach 2016, S. 2].

In Abb. 13 werden die Bestandserfassungsmethoden zunächst in kontaktfreie Methoden und Methoden mit Kontakt unterschieden. Die kontaktfreien Methoden werden in bildbasierte Techniken, entfernungs-basierte Techniken, manuelle Techniken und in weitere Datenerfassungstechniken unterteilt [Donath 2008, S. 134], [Volk et al. 2014, S. 119], [Busen et al. 2015, S. 41–43]. Unter den bildbasierten Aufnahmetechniken in Abb. 13 findet sich die Photogrammetrie.



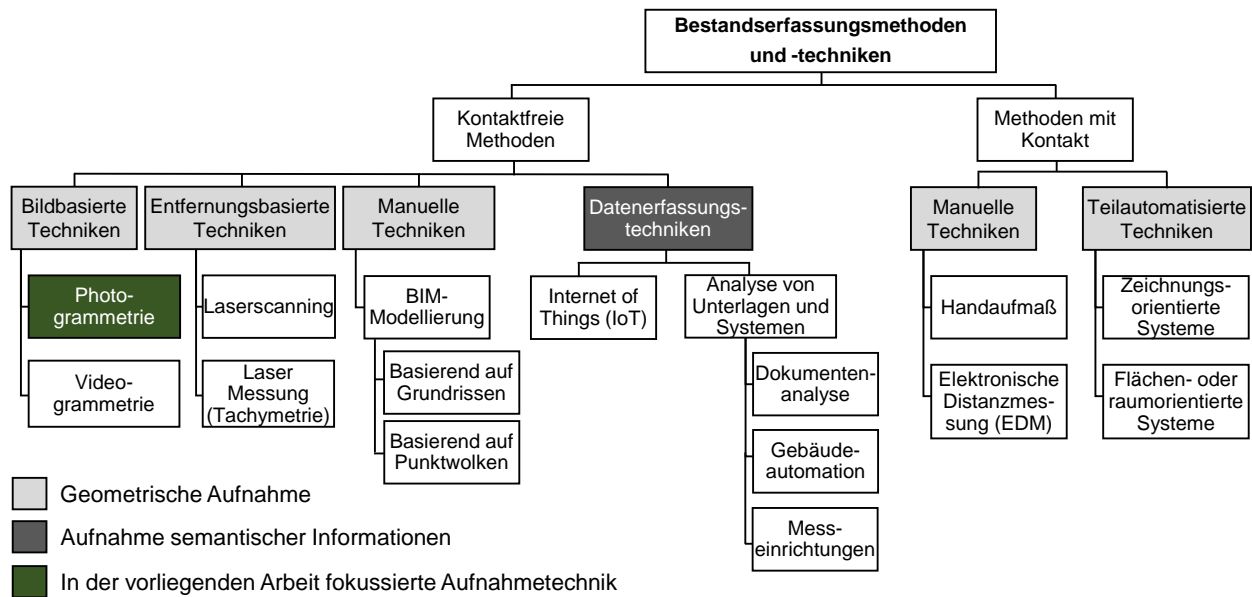


Abb. 13: Überblick von Bestandserfassungsmethoden und -techniken im Gebäudebereich in Anlehnung an [Volk et al. 2014, S. 119]

Die Photogrammetrie konnte in den letzten Jahren Fortschritte in der Technologie verzeichnen, die zusätzlich von der fortschreitenden Entwicklung der Fotografie hinsichtlich verbesserter Auflösung profitiert hat [Henze 2015, S. 139]. Die Weiterentwicklung von Photogrammetrie- und Bildverarbeitungssoftware hat sich durch Verbesserungen der Verarbeitungszeit und -qualität bemerkbar gemacht [Galantucci & Fatiguso 2019, S. 51]. Grundsätzlich lässt sich die Photogrammetrie für Architekturaufnahmen in die Einzelbildphotogrammetrie, Stereophotogrammetrie und Mehrbildphotogrammetrie [Wiedemann 2004, S. 178–180] einteilen.

Um komplexe Strukturen einer Fabrik und deren Gebäudetechnik aufzunehmen, eignet sich die Mehrbildphotogrammetrie. Mit der Mehrbildphotogrammetrie können unter Verwendung des Triangulationsverfahrens [VDI 2634-2 2012, S. 3] dreidimensionale Modelle abgeleitet werden. Im Folgenden werden die Begriffe Mehrbildphotogrammetrie und Photogrammetrie synonym verwendet. Bei dieser Technik wird aus mehreren Bildern eines Objektes indirekt dessen Form und Position anhand von Bildmessungen bestimmt [Luhmann & Maas 2016, S. 20]. Zweck der photogrammetrischen Aufnahme eines Zielobjektes ist es, mithilfe von zweidimensionalen Fotos eine dreidimensionale geometrische Rekonstruktion zu erzeugen [Fritsch 2016, S. 25–27]. Bei der Erstellung der Fotos unterscheiden sich die Techniken im Baubereich durch die unterschiedliche Handhabung der Kameras: Handgetragene Kamera, flugzeuggetragene Kamera von einem bemannten oder unbemannten Luftfahrzeug (Englisch: unmanned aerial vehicle, UAV), kranmontierte Kamera und Kameras auf Fahrerlosen Transportfahrzeugen (FTF), [Tuttas 2017, S. 27–34], [Cheong & Lee 2018, S. 106], [Witte et al. 2020, S. 346]. In Hinblick auf die aufzunehmende Objektgröße können kleinteilige Bauteile der Gebäudetechnik sowie vollständige Bauwerke er-

fasst werden. Die Videogrammetrie (Abb. 13) hat die gleiche Funktionalität wie die Photogrammetrie, nutzt jedoch als Eingangsdaten Videos anstelle einer Sammlung von Bildern [Brilakis et al. 2011, S. 884], [Wang et al. 2019, S. 483]. Beide Technologien können auf Baustellen, bei Bauarbeiten und für die Vermessung bestehender Gebäude eingesetzt werden [Braun et al. 2015, S. 1], [Wang et al. 2019, S. 480]. Ein weiterer Vorteil, der in Bezug auf die Photo- und Videogrammetrie zu nennen ist, ist die Einsatzmöglichkeit von kostengünstigen Endgeräten für die Objekterfassung.

Der Photogrammetrie gegenübergestellt, gehört das Laserscanning zu den entfernungs-basierten und etablierteren Aufnahmetechniken (Abb. 13). Grundlegend wird zwischen dem Airborne Laserscanning (ALS), bei dem von Flugzeugen, Hubschraubern oder UAVs aus aufgenommen wird, dem terrestrischem Laserscanning (TLS) und mobilen Laserscanning (MLS) unterschieden. Diese polare Messmethode nimmt die Daten flächenhaft auf und wertet diese aus [Pfeifer et al. 2016, S. 2]. 3D-Laserscanner liefern eine Punktwolke, in der die Koordinaten sämtlicher vermessener Punkte enthalten sind. Eine Punktwolke, z.B. im Format .xyz, weist jedem Messpunkt drei Einträge (kartesische Koordinaten: XYZ) hinsichtlich der räumlichen Information zu [Kuhlmann & Holst 2016, S. 10 f.]. Geometrische Qualitätskriterien für Punktwolken sind die Punktdichte und die absolute Genauigkeit [Kersten 2017, S. 5]. Die Punktdichte gibt den durchschnittlichen Abstand zwischen den einzelnen Messpunkten wieder und liefert somit einen Anhaltspunkt für die Größe des kleinsten Objekts, das erfasst werden kann [Becker 2011, S. 77]. Im Gegensatz zur Photogrammetrie, die Vorteile bei kleinteiligen Objekten hat, können Laserscanner nach dem Inside-Out-Prinzip große Flächen oder Räume schnell und effizient aufnehmen (Abb. 14).

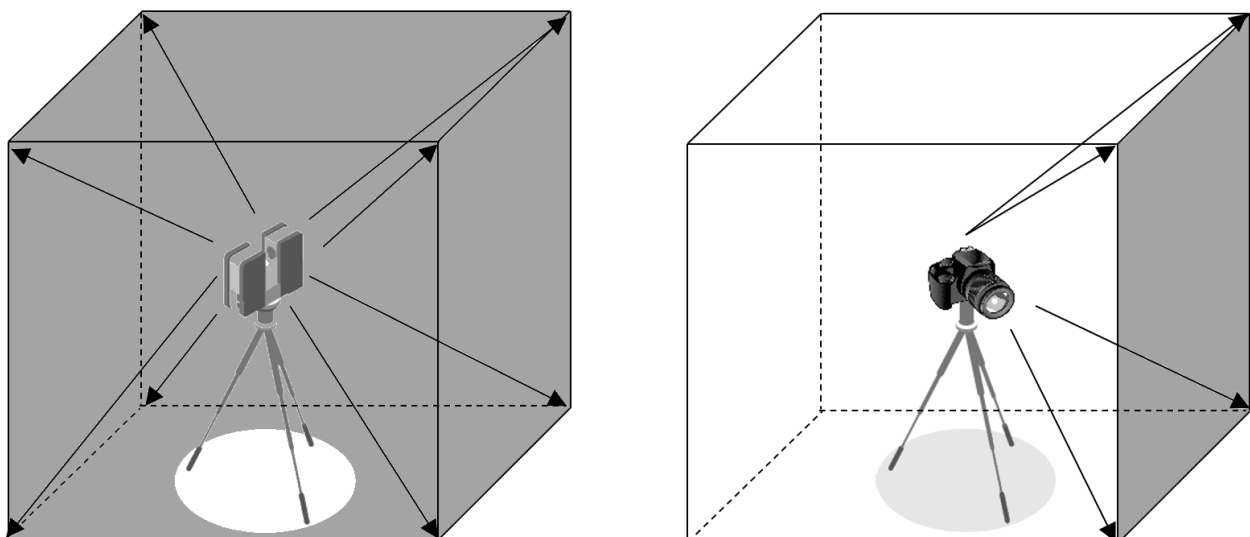


Abb. 14: Aufnahmeprinzip des Laserscannings (links) und der Photogrammetrie (rechts)

Bei der tachymetrischen Aufnahme (Abb. 13) erfolgt, unerheblich ob optisch oder elektronisch, das Aufmaß von diskreten Punkten, für die Horizontal- und Vertikalwinkel sowie Schrägdistanzen als Primärdaten erfasst werden [Tscharf 2018, S. 60].

Die zu den manuellen Techniken gehörende BIM-Modellierung (Abb. 13), greift auf die durch das Laserscanning, Photo- oder Videogrammetrie erzeugten Punktwolken zurück, die den Modellierungsprozess eines BIM-Modells unterstützen [Macher et al. 2017, S. 1]. Außerdem können bestehende Grundrisspläne verwendet werden, um BIM-Modelle zu rekonstruieren. Aktuelle Forschungsansätze zielen bereits auf die teilautomatisierte [Macher et al. 2017, S. 1] und automatisierte Modellierung von BIM-Modellen aus Punktwolken ab [Ochmann et al. 2019, S. 252], [Czerniawski & Leite 2020, S. 2]. Diese Ansätze werden unter dem Begriff „Scan-to-BIM“ zusammengefasst [Macher et al. 2017, S. 1], [Adán et al. 2018, S. 119], [Adán et al. 2020, S. 1].

Erfassungstechniken für semantische Daten [Imfeld 2002, S. 11] gehören ebenfalls zu den kontaktfreien Methoden und beziehen sich hauptsächlich auf die Erfassung von nicht-geometrischen Informationen (Abb. 13). Im Kontext „Gebäudemodell“ bieten semantische Informationen zusätzliche Informationen zu den verwalteten Modellelementen und ermöglichen einen erweiterten Datenzugriff [Minoli et al. 2017, S. 269], [Tang et al. 2019, S. 129 f.]. Die Datenanalyse und Aggregation von analogen und digitalen Informationsquellen über Gebäudedaten wie Dokumente, Gebäudeautomationssysteme oder Messeinrichtungen in jeglicher Form, bietet zusätzliche Einblicke in die Betriebsphase von Gebäuden [Burak Gunay et al. 2019, S. 105]. Die hier genannten und abgebildeten Datenerfassungstechniken (Abb. 13) sind nicht erschöpfend.

Basierend auf den genannten Techniken zur Gebäudevermessung und Datenerfassung werden digitale Gebäudemodelle erstellt und mit weiteren Informationen angereichert. Generell kann so eine entstehende digitale Repräsentation eines Gebäudes abgeleitet werden, die als digitales Gebäudemodell oder Punktwolke bezeichnet wird. Ob bei einem Umbau in einer Fabrik eine Punktwolke oder ein BIM-Modell eingesetzt wird, hängt vom konkreten Umbaufall ab. Die Punktwolken der Laserscans und Photogrammetrieberechnungen können zusammengeführt bzw. registriert werden [Mikrut et al. 2014, S. 41], [Fawzy 2019, S. 1192]. Unter der Registrierung wird grundsätzlich das Überführen aller Objektpunkte in ein übergeordnetes Koordinatensystem verstanden. Die Integration in ein gemeinsames Koordinatensystem durch die notwendige Transformation kann teilautomatisiert oder weitestgehend automatisiert, wie durch das Iterative Closest Point (ICP) Verfahren von Besl und McKay, durchgeführt werden [Besl & McKay 1992, S. 239], [Chetverikov et al. 2005, S. 299]. Eine ausführliche Chronologie zu Veröffentlichungen der Integration von Photogrammetrie und TLS liefert Hassan und Fritsch [Hassan & Fritsch 2019, S. 86]. Außerdem wird für einen weiterführenden Einblick in das Thema digitale Modelle aus benachbarten Disziplinen [Vajna et al. 2018, S. 159 ff.] empfohlen.

## 2.3 Zwischenfazit

Zur Unterstützung des Prozesses der Fabrikumbauplanung (Abb. 7) wird im Verlauf der vorliegenden Arbeit eine Reduzierung der notwendigen Reaktionszeit sowie die Unterstützung der Zielerreichung in den fokussierten Phasen der Fabrikumbauplanung angestrebt. Grundsätzlich ist es möglich, den Prozess der Fabrikumbauplanung, in den Phasen der Wahrnehmung, Analyse, Planung und Entscheidung unterstützen (Abb. 7). Besonders mit Blick auf die immer kürzer werdenden Lebenszyklen der Produkte (vgl. Kapitel 1.2) und den resultierenden Umplanungen ist dies notwendig. Der Zeitdruck hinsichtlich der durchzuführenden Fabrikumbauplanung wird daher als die stark begrenzte Reaktionszeit (Zeitfenster) durch den Wettbewerbsdruck (Time-to-Market) definiert. Der Herausforderung „Zeitdruck“ wird in der vorliegenden Arbeit mit einer erhöhten Veränderungsgeschwindigkeit (Abb. 8) begegnet. Verzögerungen entstehen bspw. durch zeitaufwändige Ist-Analysen in der Phase der Informationsbeschaffung (Abb. 7). In fünf durchgeführten explorativen Experteninterviews konnte bestätigt werden, dass zeitaufwändige Ist-Analysen des Bestands wegen unzureichender Dokumentation oder veralteten Planunterlagen messbare Verzögerungen bei Umbauprozessen hervorrufen (Anhang A, Tab. A.3). Außerdem wird in einem durchgeführten Workshop die damit zusammenhängende Aktualisierung von digitalen Gebäude-Modellen zu den wichtigsten Forschungsbedarfen gezählt (Anhang B, Tab. B.2).

Dabei ist zu berücksichtigen, dass es nur mit einem integrierten Planungsansatz, in den alle Planungsbeteiligten (Abb. 11) involviert sind sowie unter Verwendung von digitalen Werkzeugen möglich ist, Fabrikumbauplanungen so zu unterstützen, dass der Prozess der Fabrikumbauplanung verkürzt wird. Digitale Repräsentationen aus der Produktion (Digitale Fabrik [Lehmann 2008], Computer-integrated manufacturing (CIM) [Jacobi 2013], cyber-physische Systeme (CPS) [Uhlemann et al. 2017], Digitaler Zwilling [Herlynp & Zadek 2020]) oder des Gebäudes (Punktwolken und BIM-Modelle) können die Grundlage für Umplanungsaktivitäten in Fabriken liefern. Vorausgesetzt ein digitales Modell beinhaltet die Geometrie aller relevanten Fabrikobjekte (Abb. 9) sowie deren semantische Informationen in einem aktuellen Stand. Bis sämtliche Produktions- und Gebäudesysteme automatisiert aktualisiert werden und eine eigenständige Vernetzung aufweisen [Bauernhansl et al. 2016, S. 15], [Behrens et al. 2018, S. 11 f.], verlangt die Umbauplanung weiterhin eine Bestandserfassung bzw. Modellerstellung sowie eine Informationsbewertung, wie sie in [VDI 5200-1 2011, S. 11] in der Phase der Grundlagenermittlung beschrieben ist. Gerade in der Grundlagenermittlung wird durch die Experteninterviews (Anhang A) eine Verzögerung identifiziert, die auf fehlende aktuelle Planunterlagen des Gebäudes zurückzuführen ist. Die Ausführungen zu den Grundlagen des Laserscannings, Photogrammetrie und BIM sowie den Ergebnissen von wissenschaftlichen Veröffentlichungen [Thomson et al. 2013, S. 289], [Shellhear et al. 2015, S. 67] legen den Schluss nahe, dass zur Erstaufnahme der Geometrie einer

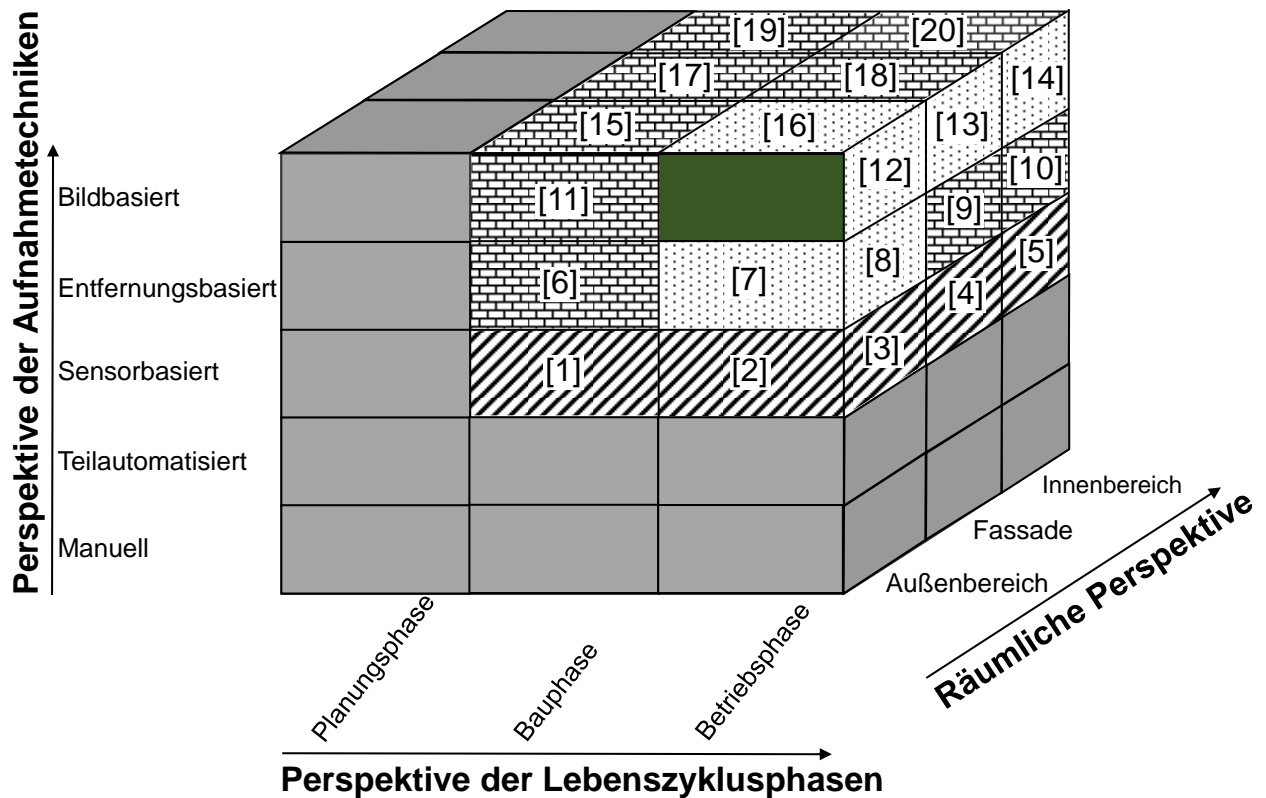
bestehenden Fabrik das Laserscanning, terrestrisch (TLS) oder mobil (MLS), am geeignetsten ist. Zusätzlich bietet sich bei Bestandsgebäuden, nach Aufnahme der Punktwolke, die Scan-to-BIM Methode an. Die Photogrammetrie dagegen kann für kleinteilige Aufnahmen und somit für Aktualisierungen von Punktwolken eingesetzt werden. Insbesondere Weiterentwicklungen hinsichtlich Fotografie und Photogrammetriesoftware deuten auf vielversprechende Ergebnisse hin, die jedoch in Versuchen noch wissenschaftlich validiert werden müssen. Die entstehenden Punktwolken können wiederum als Basis für die BIM-Modellierung genutzt werden. Um den aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik zu eruieren, werden im nachfolgenden Kapitel bestehende Ansätze untersucht, die den Prozess der Fabrikumbauplanung in den betrachteten Phasen (Abb. 7) adressieren.

### **3 Stand der Wissenschaft und Technik - Bestehende Ansätze, Defizite und Handlungsbedarf**

Im letzten Kapitel wurde die Notwendigkeit zur Entwicklung einer Methodik zur Unterstützung von Prozessen der Fabrikumbauplanung, die auf aktuellen digitalen Fabrikgebäudemodellen basiert, bereits angedeutet. Nachfolgend soll durch die Bewertung von bestehenden Ansätzen der Forschungsbedarf identifiziert und konkretisiert werden. Es werden Ansätze zur (1) Aktualisierung von digitalen Fabrikgebäudemodellen, (2) Identifikation der Auswirkungen von Veränderungen innerhalb der Fabrik, (3) Informationsanforderungserhebung an das digitale Fabrikgebäudemodell bei einer Fabrikumbauplanung und (4) Informationsbereitstellung und Entscheidungsunterstützung analysiert. Es werden jeweils Defizite von bestehenden Ansätzen herausgearbeitet, bewertet sowie darauf aufbauend der Handlungsbedarf formuliert.

#### **3.1 Ansätze zur Aktualisierung von Gebäudemodellen**

Nachfolgend werden Ansätze betrachtet, welche auf die Aktualisierung von geometrischen Modellen abzielen. Dafür werden nicht nur Ansätze zu Fabrikgebäudemodellen betrachtet, da dazu bisher nur vereinzelt Vorgehensweisen existieren. Es findet ebenfalls eine Bewertung von Ansätzen aus thematisch benachbarten Forschungsdisziplinen statt, die sich der geometrischen Aktualisierung digitaler Gebäudemodelle widmen aber in der Disziplin der Fabrikplanung noch keine Verwendung gefunden haben. Dies soll erlauben Anhaltspunkte für eine geeignete Vorgehensweise zur kontinuierlichen Aktualisierung von Fabrikgebäudemodellen ableiten zu können.







-  Aktualisierungsansatz bezogen auf Punktwolken [Geometrie]
-  Aktualisierungsansatz bezogen auf BIM-Modelle [Geometrie]
-  Aktualisierungsansatz bezogen auf BIM-Modelle [Attribut- bzw. Metadaten]
-  In der vorliegenden Arbeit fokussierter Aktualisierungsansatz bezogen auf Punktwolken und BIM-Modelle [Geometrie]

Abb. 15: Die drei Perspektiven der Aktualisierungsansätze im Gebäudekontext

Ansätze, welche die Aktualisierung von digitalen Gebäudedaten adressieren, lassen sich gliedern nach den Aufnahmetechniken, nach den Lebenszyklusphasen eines Gebäudes, in denen sie zur Anwendung kommen und in Ansätze, die Aktualisierungen in Außenbereichen [Caroti et al. 2017], an der Fassade oder in Innenbereichen von Gebäuden durchführen (Abb. 15). Zusätzlich ist zu prüfen, ob die bestehenden Ansätze darauf ausgelegt sind, Punktwolken oder BIM-Modelle zu aktualisieren (Abb. 15). Im Folgenden werden Veröffentlichungen zur Aktualisierung von Punktwolken und BIM-Modellen von Gebäuden aus den verschiedenen Perspektiven diskutiert, um den Stand der Wissenschaft und Technik abzubilden.

Auf Ansätze, die sich nicht auf die Geometrie beziehen (Abb. 15), wie sensorbasierte Datenaktualisierungen [Mishra et al. 2020], [Louis & Dunston 2018], [Tserng et al. 2014], [Böke et al. 2020], [Pourzolfaghar & Helfert 2017] sowie manuelle [Donath 2008, S. 47] oder teilautomatisierte Ansätze [Donath 2008, S. 53–55], wird nicht näher eingegangen. Scan-to-BIM Ansätze können als

automatisierte bzw. teilautomatisierte Verfahren zur Aktualisierung von Bestandsgebäuden genutzt werden. Es gibt sowohl Scan-to-BIM Ansätze, die zur Erzeugung der Punktwolken in der Bauphase [Gao et al. 2015], [Zhang & Arditi 2020], als auch für automatisierte BIM-Modellierung des Außenbereichs [Awrangjeb 2015] oder der Fassade [Tang et al. 2010], [Ochmann et al. 2019] auf entfernungs- und bildbasierte Aufnahmetechniken [Braun et al. 2015], [Kim et al. 2013b] zurückgreifen (Abb. 15).

Die in Abb. 15 genannten Aktualisierungsansätze sind repräsentativ für die damit verbundenen Forschungsgebiete und liefern jeweils im Kontext der Gebäudedatenaktualisierung einen relevanten Beitrag. Die Zuordnung der Ansätze über die Nummern in Abb. 15 erfolgt durch Tab. 1. Vereinzelt gibt es in den betrachteten Forschungsgebieten (z.B. bildbasierte Aktualisierungsansätze der Fassade) keine existierende Aktualisierungsansätze. Ist dies der Fall, werden Ansätze ausgewählt, deren Vorgehensweise zumindest in der Theorie zur Aktualisierung geeignet ist. Die Mehrzahl der betrachteten Ansätze (Abb. 15) erzeugen zunächst Punktwolken (photogrammetrisch oder entfernungs-basiert), um anschließend das BIM-Modell zu aktualisieren. In Abb. 15 werden die Ansätze dem Aktualisierungsbezug Punktwolken [Geometrie], dem BIM-Modell [Geometrie] oder BIM-Modell [Attribut- bzw. Metadaten] zugeordnet, der das Endprodukt der Aktualisierung darstellt. Die nachfolgend untersuchten Forschungsansätze zu Aktualisierungsvorgehen stellen den Stand der Wissenschaft aus verschiedenen Forschungsbereichen dar.

Tab. 1: Quellennachweise der Abbildung 15

<b>Nummer</b>	<b>Kurzbezeichnung</b>	<b>Nummer</b>	<b>Kurzbezeichnung</b>
[1]	[Louis & Dunston 2018]	[11]	[Kim et al. 2013b]
[2]	[Mishra et al. 2020]	[12]	[Caroti et al. 2017]
[3]	[Tserng et al. 2014]	[13]	[Russo et al. 2019]
[4]	[Böke et al. 2020]	[14]	[Amer & Golparvar-Fard 2018a]
[5]	[Asadi et al. 2019]	[15]	[Antova & Tanev 2020]
[6]	[Gao et al. 2015]	[16]	[Zhang & Arditi 2020]
[7]	[Shellshear et al. 2015]	[17]	[Mahami et al. 2019]
[8]	[Awrangjeb 2015]	[18]	[Baik 2019]
[9]	[Tang et al. 2010]	[19]	[Pučko et al. 2018]
[10]	[Adán et al. 2020]	[20]	[Kang et al. 2020]

Ein Forschungsbereich, der sich über Jahrzehnte entwickelt und bereits ausgereifte Verfahren zur Bestandserfassung hervorgebracht hat, ist die Denkmalpflege [Franz & Vinken 2017, S. 10 f.]. Das Historic Building Information Modeling (HBIM) kann innerhalb der Denkmalpflege als auf-



strebender Forschungszweig betrachtet werden. Der HBIM-Prozess startet mit der Fernerkundung mittels terrestrischen bzw. mobilen Laserscannern oder mit hochauflösenden Kameras [Murphy et al. 2013, S. 89]. Einen Überblick über HBIM liefert die Publikation von [Yang et al. 2020], die den aktuellen Stand zur Modellierung der Geometrie und des Informationsmanagements des Kulturerbes darstellt.

In diesem Kontext veröffentlicht [Russo et al. 2019, S. 290] einen Ansatz, der mit einer bildbasierten Aufnahmetechnologie Fassaden von Kathedralen aufnimmt und diese mittels Photogrammetrie rekonstruiert. Es wird beurteilt, ob die Fotos von Smartphonekameras bei der Verwendung mit Photogrammetriesoftware für Architekten und Restaurateure verwendbare Ergebnisse liefern [Russo et al. 2019, S. 289]. Verglichen mit Daten von Laserscannern wird ersichtlich, dass die Ungenauigkeit der Fassadenelemente mit ansteigender Entfernung (ab ca. 12 m) vom Aufnahmeobjekt zunimmt [Russo et al. 2019, S. 290]. Obwohl bei dem Versuchsaufbau von Russo eine einzelne Aufnahme zu einem Aufnahmezeitpunkt durchgeführt wird, die zur Erstaufnahme eines historischen Gebäudes dient, kann die Vorgehensweise auch zur Aktualisierung des Gebäudezustands verwendet werden. Bei historischen Gebäuden ist die Aufnahme oftmals verbunden mit der Dokumentation des Gebäudezustands über die Zeit [Yang et al. 2020, S. 351].

In Bezug auf die Bewertung des Ansatzes hinsichtlich eines Vorgehens zur inkrementellen Aktualisierung kleinteiliger Änderungen eines Fabrikgebäudes, werden keine Anhaltspunkte geliefert, inwiefern die kostengünstigen Smartphones kleinteilige Gebäudebereiche durch einen kurzen Aufnahmeprozess vor Ort erfassen können. Es werden ausschließlich großflächige Fassadenaufnahmen untersucht. Die analysierte Genauigkeit bzw. die untersuchten Abweichungen zwischen den Aufnahmen des eingesetzten Laserscanners und den photogrammetrisch erstellten Modellen der Smartphones liefern dahingegen aufschlussreiche Vergleichsergebnisse [Russo et al. 2019, S. 289], die in der vorliegenden Arbeit weiterverfolgt werden.

Ein weiteres Forschungsgebiet, das auf hochfrequente Aktualisierungen angewiesen ist, ist die Baufortschrittskontrolle auf Baustellen des Hoch- und Tiefbaus [Tuttas et al. 2017, S. 4]. Bildbasierte Ansätze, die sich auf die Baufortschrittskontrolle in Innenräumen konzentrieren, liefern [Amer & Golparvar-Fard 2018a], [Amer & Golparvar-Fard 2018b]. Es werden durch Bild- und Videoaufnahmen die täglich sich auf Baustellen schnell verändernden Umgebungen aufgenommen [Amer & Golparvar-Fard 2018b, S. 491]. Die vorgeschlagene Methode nutzt einen Prozess, der Structure-from-Motion (SfM) und Multi-View Stereo (MVS) Algorithmen verwendet, um dichte 3D-Punktwolken aus Fotos zu erzeugen, die von verschiedenen Personen aus unterschiedlichen Gewerken an ihrem Einsatzort auf der Baustelle aufgenommen werden [Amer & Golparvar-Fard 2018b, S. 494 f.]. Die entstehenden Punktwolken werden anschließend verknüpft und ermöglichen im Vergleich mit dem existierenden BIM-Modell eine Analyse des Ist-Zustandes und den Vergleich mit dem Soll-Zustand.

Der Ansatz beschränkt sich folglich auf die Aktualisierung der Punktwolken und zielt auf eine Verkürzung der Berechnungszeit der Punktwolke aus den Fotoaufnahmen ab [Amer & Golparvar-Fard 2018a, S. 1]. Die Reduktion der Aufnahmezeit vor Ort spielt in dem Ansatz eine untergeordnete Rolle. Allerdings kommt in diesem Ansatz kostengünstige Hardware (Smartphones, Drohnen etc.) zum Einsatz, um auf kostenintensive Laserscanner zu verzichten [Amer & Golparvar-Fard 2018a, S. 2].

Stellvertretend für das Forschungsgebiet Scan-to-BIM wird der Ansatz von [Adán et al. 2018, S. 119] vorgestellt. Darin wird hervorgehoben, wie wichtig aktuelle BIM-Modelle in der Betriebsphase eines Gebäudes sind, um diese bspw. für das Facility Management zu nutzen. Der Ansatz erweitert herkömmliche Scan-to-BIM Ansätze, die eine automatisierte Modellierung auf Grundlage von Laserscans oder photogrammetrischen Daten von architektonisch strukturellen Bauteilen (Wänden, Decken, Stützen usw.) durchführen um die Erstellung von sekundären Bauteilen der technischen Gebäudeausrüstung. Der Ansatz greift zur Erzeugung der Punktwolken auf terrestrische Laserscanner kombiniert mit einer Spiegelreflexkamera zurück [Adán et al. 2018, S. 136].

Ogleich der Ansatz sich auf kleinteilige Elemente der technischen Gebäudeausrüstung fokussiert, kommt mit dem verwendeten Laserscanner kostenintensive Hardware zum Einsatz. Darüber hinaus wird der Schwerpunkt der Untersuchung durch die Kombination von bildbasierten und geometrischen Algorithmen [Adán et al. 2018, S. 138] auf die Nachbearbeitung der erzeugten Daten gelegt. Der zeitsparenden Erfassung vor Ort widmet sich der Ansatz nicht.

Shellshear et al. entwickeln für die Betriebsphase von Fabriken einen Aktualisierungsansatz, der mit dem Laserscanning auf einer entfernungs-basierten Aufnahmetechnik beruht [Shellshear et al. 2015]. Inkrementell werden Punktwolken der Produktionsbereiche mithilfe von Laserscannern in einer Fabrikumgebung aktualisiert [Shellshear et al. 2015, S. 65]. Zur Registrierung der neu erstellten Punktwolken werden Marker verwendet, die in der ganzen Fabrik verteilt und möglichst von allen Scanpositionen sichtbar sind.

Dieser Ansatz eignet sich, um größere Änderungen in der Fabrik abzubilden. Bei kleinteiligen Änderungen sind Laserscanner oftmals ungeeignet, da bei freistehenden Objekten der Laserscanner mehrfach um das aufzunehmende Objekt herum platziert werden muss, um genügend Scanpositionen zu erreichen (Abb. 14). Das führt dazu, dass der vorgeschlagene Aktualisierungsprozess bei kleinteiligen Änderungen nicht nur sehr zeitaufwändig, sondern durch die vergleichsweise kostenintensive Hardware von Laserscannern zu hohen Kosten führt. Zudem konzentriert sich die Aktualisierung rein auf die Produktionsbereiche. Das Fabrikgebäude und dessen Aktualisierung findet keine Beachtung.

Einen weiterführenden Überblick über den aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik zu Aktualisierungsverfahren von digitalen Gebäudemodellen liefert [Hellmuth 2022] durch die Kombination aus systematischer und bibliometrischer Literaturanalyse.

### **3.2 Ansätze zur Identifikation der Auswirkungen von Veränderungen in der Produktion auf das Fabrikgebäude**

In diesem Kapitel werden die für die Phase der Informationsauswertung (Abb. 7) relevanten Forschungsansätze hinsichtlich der Identifikation der Auswirkungen von Veränderungen innerhalb der Fabrikplanung vorgestellt.

Lübke mann entwickelt eine Methode in der die Auswirkungen von unternehmensinternen und -externen Veränderungstreibern analysiert und abgeschätzt werden [Lübke mann 2016]. Dieser Ansatz wird über mehrere Veröffentlichungen hinweg entwickelt [Richter et al. 2014], [Lübke mann & Nyhuis 2016], [Lübke mann 2016]. Die Fabrikstruktur besteht in dem Ansatz aus physischen und nicht-physischen Fabrikelementen auf unterschiedlichen Aggregationsniveaus [Lübke mann & Nyhuis 2016, S. 8]. Aus der Produktionssicht wird als Teil des Vorgehensmodells mit Hilfe eines morphologischen Kastens und einer Einordnung in eine Bewertungsmatrix der Restrukturierungsbedarf aufgrund einer konkreten Veränderung abgeleitet [Lübke mann 2016, S. 126]. Die Identifikation der Auswirkungen der Veränderung auf die Strukturelemente der Fabrik findet durch die Analyse struktureller Kennzahlen statt [Lübke mann 2016, S. 107]. Die von der Veränderung betroffenen Fabrikbereiche werden entsprechend ermittelt. Die Methode von Lübke mann fokussiert sich auf Restrukturierungsprojekte in produzierenden Unternehmen unter der Voraussetzung, in der variantenreichen Stückgutindustrie eingesetzt zu werden.

Zwar ist die Ebene des Fabrikgebäudes Teil der Methode von [Lübke mann 2016, S. 107], jedoch werden keine Aussagen über Veränderungen von Fabrikobjekten des Industriebaus getroffen. Auswirkungen auf das Fabrikgebäude, wie es in der vorliegenden Arbeit unter dem holistischen Begriff der Fabrikumbauplanung verstanden wird, finden in der Methode von Lübke mann keine Beachtung. Die in dem Ansatz verwendete Abstraktionsebene, auf welcher die Auswirkungen auf die Strukturelemente der Fabrik (Produktion, Montage, Wartung etc.) angegeben werden, liefert keinen detaillierten Aufschluss über die konkret betroffenen Fabrikelemente des Industriebaus [Richter et al. 2014, S. 3455]. Zudem sind für die Anwendung der Methode manuelle und somit zeitaufwändige Analysen durchzuführen. Eine Automatisierung des Modells und die damit verbundene Datenaktualisierung der bestehenden Fabrikstruktur aus ERP-Systemen steht noch aus [Lübke mann & Nyhuis 2016, S. 10].

Der Ansatz von [Plehn et al. 2016] liefert eine Entscheidungshilfe für das Änderungsmanagement in der Fertigung sowie eine Bewertung der Auswirkungen von Veränderungen und ihrer Folgewirkungen in Fertigungssystemen. Dazu wird ein modellbasierter Ansatz zur Vorhersage und Bewertung der Änderungsfortpflanzung erarbeitet. Kern des Ansatzes ist ein Graphenalgorithmus, der die Auswirkungen identifizieren soll. Hierfür werden die Ergebnisse aus einer Multiple Domain Matrix (MDM) verwendet. Eine MDM ist im Kern eine Design-Structure-Matrix (DSM) mit detaillierteren DSMs entlang der Diagonalen. Ziel ist es zusätzlich, die Kosten und die erwarteten Arbeitsstunden für das Änderungsprojekt identifizieren zu können.

In dem diskutierten Ansatz wird zwar eine Teilautomatisierung der Änderungsdetektion mit Hilfe einer Kombination aus BFS-Algorithmus (Breadth-First Search) und Monte-Carlo-Simulation verfolgt [Plehn et al. 2016, S. 484], jedoch sind zusätzlich erhebliche manuelle Prozesse wie Workshops notwendig, die insgesamt mehrere Arbeitstage beanspruchen [Plehn et al. 2016, S. 485]. Darüber hinaus werden mögliche Auswirkungen auf das Fabrikgebäude in diesem Ansatz nicht berücksichtigt.

[Bauer et al. 2020] entwickeln einen modularen Ansatz, um Anpassungen eines Produktionssystems zu bewerten und Auswirkungen zu identifizieren. Das erste der vier Module bestimmt die betroffenen Fabrikelemente (Ja oder Nein) und die jeweilige Eintrittswahrscheinlichkeit, indem auf Grundlage von Experteninterviews eine sogenannte Domain Mapping Matrix ausgefüllt wird. Die Entscheidung über die betroffenen Elemente findet in einer Expertensitzung statt [Bauer et al. 2020, S. 450]. Für die Validierung wurde mit Matlab ein CIA-Tool (Change Impact Analysis) entwickelt, um in einem frühen Stadium eine Bewertung der technischen Auswirkungen innerhalb des Produktionssystems identifizieren zu können.

Der Ansatz von [Bauer et al. 2020] fokussiert sich, vor allem in der Validierung, auf sehr begrenzte Einsatzgebiete: Auswirkungen von Änderungen der Produkteigenschaften auf Prozessmerkmale [Bauer et al. 2020, S. 452]. Eine umfangreichere und holistischere Betrachtung des Systems Fabrik, das auch Elemente des Fabrikgebäudes umfasst, findet nicht statt. Zudem sind für den Ansatz von [Bauer et al. 2020, S. 450] manuelle Aktivitäten wie Experteninterviews und Expertensitzungen notwendig, welche die Durchführung zeitaufwändig machen.

Der Ansatz zur kontextbasierten Rekonfiguration von Fabrikssystemen von [Frankenbach et al. 2020] liefert ein Konzept zur Rekonfiguration bestehender Fabrikssysteme, das eine Reaktion auf Veränderungen im Fabrikumfeld ermöglicht. Grundlage des Ansatzes ist die Entwicklung eines morphologischen Modells, das eine Analyse der triadischen Wirkbeziehung zwischen Fabrikzielen, Fabrikkontext und Fabrikssystem erlaubt. Die Wirkbeziehungen werden durch eine DSM analysiert, wodurch sich der Beitrag der Fabrikelemente zu den Fabrikzielen unter Berücksichtigung

des Fabrikumfeldes ableiten lassen. Ergebnis der Analyse ist die Erkenntnis, welche Auswirkungen die Veränderung der Elemente eines Fabrikums auf das Erreichen der Ziele hat [Frankenbach et al. 2020, S. 752].

Im Ansatz von [Frankenbach et al. 2020] werden die Wirkbeziehungen innerhalb der Fabrik untersucht, die in der vorliegenden Arbeit ebenfalls zu berücksichtigen sind. Die Fabrikobjekte des Industriebaus werden allerdings in die Auswirkungsanalyse nicht miteinbezogen. Weiterhin geht der Ansatz über ein Konzeptstadium nicht hinaus, da eine Validierung nicht stattfindet.

Ein aktueller Ansatz von [Sippl & Reinhart 2021] entwickelt eine Methode zur datengestützten Analyse der Auswirkungen von Veränderungen in der Fertigung. In der Veröffentlichung wird ein ganzheitlicher konzeptioneller Rahmen für die Analyse der Auswirkungen von Veränderungen mit Hilfe der Datenanalysemethode des Process Minings vorgestellt. Der Fokus des Ansatzes liegt auf der Identifikation der von der jeweiligen Veränderung betroffenen Abteilungen und beschäftigt sich somit vornehmlich mit der Organisationsstruktur [Sippl & Reinhart 2021, S. 251]. Die Organisationsstruktur wird dafür zuvor digital modelliert.

Nachdem eine Validierung des Ansatzes noch aussteht, befindet sich die datengestützte Analyse noch in der Konzeptphase. Von einer vollständig automatisierten Change Impact Analyse kann auch nach einer Implementierung nicht ausgegangen werden. Denn es wird auf Expertenworkshops zurückgegriffen, um die Korrelation zwischen Prozesskomplexität und Veränderungsschwierigkeit zu ermitteln [Sippl & Reinhart 2021, S. 250]. Aufgrund der ausschließlichen Betrachtung des Fertigungssystems finden Fabrikelemente des Industriebaus keine Berücksichtigung.

Einen weiteren Ansatz liefert [Hingst et al. 2022a] mit einem Rahmenwerk zur Bewertung der Auswirkungen von Veränderungen in einer Fabrik durch die Anpassung von Lernverhaltensmodellen. Dazu wird der Regelkreis von [Wulf 2011, S. 65] erweitert, um so eine differenzierte Betrachtung durch Integration der Lernkurven in das Controlling zu ermöglichen [Hingst et al. 2022a, S. 395]. Die Identifikation der Abweichung beruht auf dem Monitoring von Kennzahlen. Außerdem ist der Faktor der Unsicherheit von einwirkenden Einflüssen wesentlicher Bestandteil der Methode [Hingst et al. 2022a, S. 396].

Der Fokus der Methode bezieht sich auf Reorganisationen und Rekonfigurationen. Fabrikumbaumaßnahmen im Sinne der vorliegenden Arbeit werden nicht berücksichtigt. Überdies liefert die Methode keine Aussage über die von einer Veränderung konkret betroffenen Fabrikelemente. Eine Automatisierung des Vorgehens wird weder angestrebt noch umgesetzt.

### **3.3 Ansätze zur Erhebung von Informationsanforderungen der Planungsbeteiligten an das digitale Fabrikgebäudemodell**

Bei den aktuell existierenden Ansätzen zur integrativen Fabrikplanung und Fabrikumbauplanung, welche die Produktions- und Industriebauplanung synchronisieren, ist anzunehmen, dass entsprechende Informationsanforderungen an digitale Fabrikgebäudemodelle gestellt werden. Digitale Fabrikgebäudemodelle können in der Phase der Informationsbeschaffung (Abb. 7) wesentliche Informationen für die Umplanung liefern [Neuhäuser et al. 2020, S. 68], wenn die Informationsanforderungen strukturiert erfasst sind. Die Produktions- und Industriebauplanung wird mehrheitlich insofern synchronisiert, als die Vorgehensweise nach der VDI-Richtlinie 5200 [VDI 5200-1] und die Bauphasen der HOAI [HOAI 2021] integriert betrachtet werden [Wiendahl et al. 2014, S. 454], [Burggräf et al. 2020, S. 474], [Lenz 2020, S. 23–27], [Rieke et al. 2021, S. 882]. Nach tiefergehender Analyse integrativer Ansätze [Meierlohr 2003], [Dombrowski et al. 2011], [Wiendahl et al. 2014], [Meckelnborg 2015], [Burggräf et al. 2018], [Näser & Wickenhagen 2018], [Burggräf et al. 2019], [Dannapfel et al. 2019], [Ebade Esfahani et al. 2019], [Spyridis et al. 2019], [Burggräf et al. 2020], [Graefenstein et al. 2020], [Lenz 2020], [Neuhäuser et al. 2020], [Burggräf et al. 2021a], [Burggräf et al. 2021b], [Schäfer et al. 2022a], [Schäfer et al. 2022b], [Schäfer et al. 2022c] kann konstatiert werden, dass ausschließlich im Ansatz von [Näser & Wickenhagen 2018, S. 248–250] Informationsanforderungen an ein digitales Fabrikgebäudemodell thematisiert werden. Das entwickelte Konzept strukturiert die Kommunikation im fabrikintegrierten BIM u.a. bei der Umbauplanung [Näser & Wickenhagen 2018, S. 249]. Eine Vorgehensweise zur strukturierten Informationsanforderungserhebung liefert dieser Ansatz jedoch nicht. Daher werden Methoden zur Informationsanforderungserhebung untersucht, die außerhalb des Forschungsgebietes der Fabrikplanung existieren.

Ein Ansatz, der die im BIM-Modell beinhalteten Informationen den Projektbeteiligten strukturiert unter Berücksichtigung der Projektinformationsanforderungen bereitstellt, liefert [Tolmer et al. 2017], [Tolmer & Castaing 2017], [Tolmer 2020]. Es ist der erste Ansatz, der in der Baubranche das Defizit des unstrukturierten Austausches von Informationsanforderungen identifiziert. Dieses Defizit wird im Infrastrukturbau mit der Übertragung des Requirements Engineerings aus der Softwareentwicklung adressiert. Tolmer strukturiert die Anforderungen in Produkt-, Prozess-, und Modellierungsanforderungen und leitet davon das für das Infrastrukturprojekt benötigte LOD ab. Tolmer spezifiziert sein Vorgehen auf den Infrastrukturbau, wodurch das Vorgehen für andere Anwendungsgebiete, wie die Fabrikplanung nicht geeignet ist. Außerdem liegt der Fokus auf der Entwicklung eines konzeptionellen Datenmodells, um einen Informationsüberfluss und die Unre-

gelmäßigkeiten beim Informationsaustausch in Bezug auf den benötigten LOD zu vermeiden [Tolmer 2020, S. 230]. Die Informationsanforderungserhebung, die zwar Bestandteil des Requirements Engineerings in der Softwareentwicklung ist [Herrmann 2022, S. 26], wird jedoch nicht vertiefend berücksichtigt.

Ein weiterer, von [Liebich et al. 2013] vorgestellter Ansatz, bezieht sich auf das IDM (Information Delivery Manual) der [DIN EN ISO 29481-1 2018] und [DIN EN ISO 29481-2 2017]. In der [DIN EN ISO 29481-2 2017] wird beschrieben, wie die zur Umsetzung eines Bauprojektes benötigten Informationen definiert sind und identifiziert werden [DIN EN ISO 29481-2 2017, S. 5]. In dem Ansatz erfolgt die Entwicklung eines Prozessmodells, das die Zuständigkeiten und den dadurch notwendigen Informationsaustausch strukturiert [Liebich et al. 2013, S. 9]. Es wird vorgeschlagen, die konkreten Informationsaustauschanforderungen in einer Tabelle strukturiert zu erfassen und für alle Projektbeteiligten bereitzustellen [Liebich et al. 2013, S. 12]. Diese grundlegende Strukturierung des Prozessmodells fließt in die Entwicklung der Anforderungserhebungsmethode der vorliegenden Arbeit ein. Außerdem werden die Verordnungen und Normen, die sich mit Informationsaustauschanforderungen von Bauprojekten befassen, in der Entwicklung der Methode berücksichtigt.

Obwohl der Ansatz die Informationsaustauschanforderungen systematisch strukturiert, wird auf die vorausgehende Erhebung der Informationsanforderungen nicht eingegangen. Ebenso ist das Prozessmodell auf das energieeffiziente Lebenszyklusmanagement von öffentlichen Gebäuden zugeschnitten. Für den Einsatz zur Umplanung von Fabrikgebäuden ist das Prozessmodell nicht geeignet, da die Planungsbeteiligten von Fabrikumbauplanungen und deren spezifischer Informationsbedarf nicht berücksichtigt werden.

Ein weiterer Ansatz, der sich mit der Schnittstelle zwischen IDM und MVD (Model View Definition) befasst, wird von [Lee et al. 2016] entwickelt. In der Methode werden Definitionen spezifischer Datenmodule für die MVDs zur Formalisierung des Domänenwissens vorgeschlagen. Die Autoren setzen ontologische Prinzipien ein, um ein IDM für die Betonfertigteil-Domäne zu generieren und deren MVD mit formalen Informationsmodellen zu verknüpfen.

Bei dieser Vorgehensweise wird ausschließlich die Dokumentationsform (z.B. Excel-Tabelle) der erhobenen Informationsanforderungen diskutiert [Lee et al. 2016, S. 355–356]. Wie die Anforderungserhebung von den Domänenexperten stattfindet, wird nicht erörtert. Darüber hinaus ist das Vorgehen auf die Betonfertigteilindustrie zugeschnitten. Auf Besonderheiten der Beteiligten der Fabrikumbauplanung geht dieser Ansatz demzufolge nicht ein. Dementsprechend ist das Vorgehen für die Fabrikumbauplanung nicht geeignet.

Eine aktuelle Herangehensweise zur Anforderungszuordnung aus der Produktionsdomäne liefert [Wu et al. 2022]. Für Fertigungsanlagen werden Kundenanforderungen, Anforderungen an die Fertigungsintelligenz und Fertigungsbeschränkungen unterschieden. Der Ansatz adressiert eine Anforderungsstrukturierung sowie die heterogenen Informationsanforderungen, die aus unterschiedlichen Quellen stammen. Dafür wird eine Methode zur Anforderungszuordnung vorgeschlagen, um Anforderungen aus verschiedenartigen Quellen zu zerlegen und in funktionales Wissen umzuwandeln [Wu et al. 2022, S. 478].

Der Erfassung der Anforderungen kommt in dem genannten Ansatz eine untergeordnete Rolle zuteil. Somit wird die Informationsanforderungserfassung nicht detailliert ausgestaltet, sondern als Voraussetzung angesehen. Die Berücksichtigung von Informationsanforderungen aus der Industrieplanung ist nicht Bestandteil des Ansatzes. Die vorgeschlagene Zuordnungsmethode wird in der vorliegenden Arbeit weiterverfolgt.

### **3.4 Ansätze zur Informationsbereitstellung und Entscheidungsunterstützung**

Nachfolgend werden die für die Phase der Informationsbereitstellung und Entscheidungsfindung (Abb. 7) relevanten Forschungsansätze vorgestellt. Dazu werden Ansätze zu Reorganisationen und Rekonfigurationen untersucht. Ansätze zur Informationsbereitstellung bei der Fabrikumbau- planung, die Modelle des Fabrikgebäudes beinhalten, existieren bisher nicht.

Einen Beitrag zur Informationsbereitstellung und Entscheidungsfindung für die Fabrikplanung liefert [Jiang & Nee 2013]. Unter Einsatz von Augmented Reality (AR) wird ein System entwickelt, das die Rekonfiguration von bestehenden Fertigungsbereichen unterstützt. Bestehende Anlagen und damit verbundene Einschränkungen werden via AR bei der Planung des Fabriklayouts ein- geblendet [Jiang & Nee 2013, S. 484].

Defizite hinsichtlich des Ziels von Methode 4 (Kapitel 1.3) weist der oben genannte Ansatz da- hingehend auf, dass die Inhalte nicht vor Ort, sondern an einem PC-Arbeitsplatz eingeblendet werden. Eine mobile Nutzung des Systems in der Fabrikhalle ist nicht möglich. Zudem werden mit dem AR-Softwarewerkzeug ausschließlich produktionstechnische Anlagen adressiert. Ele- mente des Fabrikgebäudes, wie dessen technische Gebäudeausrüstung, werden in dem AR- System nicht miteinbezogen.

Im Ansatz von [Kokkas & Vosniakos 2019] wird die Layoutplanung durch ein AR-Softwarewerk- zeug unterstützt. Das AR-Softwarewerkzeug soll den Nutzer befähigen, die geplanten oder in Planung befindlichen Layouts zu bewerten. Im Brownfield-Kontext werden vorhandene Restrikti- onen und existierende Anlagen berücksichtigt und die vorgesehenen Anlagenelemente durch AR



visualisiert [Kokkas & Vosniakos 2019, S. 1065]. Die Besonderheit des Ansatzes ist es, dass zusätzlich die Bewegungen der Anlagen und die Manipulation von Werkstücken dargestellt werden [Kokkas & Vosniakos 2019, S. 1070].

Das entwickelte AR-Softwarewerkzeug von [Kokkas & Vosniakos 2019] kann auf mobilen Endgeräten (z.B. Smartphones oder Tablets) verwendet werden. Dieser Aspekt wird in der vorliegenden Arbeit aufgegriffen und verfolgt. Der Ansatz beschränkt sich allerdings ausschließlich auf Fabrikelemente der Produktion. Das Fabrikgebäude und dessen Elemente werden via AR nicht dargestellt und infolgedessen ebenfalls nicht in die Entscheidungsfindung bei Restrukturierungsmaßnahmen miteinbezogen.

Ein weiterer Ansatz, der die Planung des Fabriklayouts adressiert und unterstützt, wird von [Tan et al. 2021] vorgestellt. Die Autoren befassen sich mit der AR unterstützten Entscheidungsfindung bei der Auswahl des idealen Layouts basierend auf analysierten und visualisierten Daten [Tan et al. 2021, S. 4119]. Das Softwarewerkzeug trägt in der Fallstudie dazu bei, eine neue Maschine einem bestehenden Layout hinzuzufügen und die Entscheidung transparent in Echtzeit datengestützt zu überprüfen und zu visualisieren.

Aufgrund des als Anzeigegerät verwendeten Laptops mit einer angeschlossenen Webcam [Tan et al. 2021, S. 4119] ist das AR-Werkzeug nur bedingt mobil einsetzbar. Zudem werden die Restriktionen eines bestehenden Fabrikgebäudes nicht mit in die Entscheidungsfindung einbezogen. Das AR-Softwarewerkzeug ist nicht in der Lage, das digitale Fabrikgebäudemodell einzublenden, das die platzierten Anlagen in den Gesamtkontext der Fabrik setzen.

### **3.5 Zwischenfazit und Handlungsbedarf**

Die genannten Forschungsarbeiten stellen den derzeitigen Stand der Wissenschaft und Technik zu Ansätzen dar, welche die Fabrikumbauplanung in den genannten Bereichen unterstützen.

Die Untersuchung im Forschungsgebiet der Aktualisierungsansätze (Kapitel 3.1) von Gebäuden zeigt die Heterogenität der Ansätze. Zugleich wird erkennbar, dass sich der überwiegende Teil der Ansätze sich explizit oder implizit mit der Aktualisierung von Gebäudedaten in den frühen Phasen des Lebenszyklus eines Gebäudes beschäftigt. Jedoch sind nur wenige Arbeiten in den fokussierten Betrachtungsbereich Fabrik- und Industriebauplanung in der Betriebsphase angesiedelt. Wissenschaftliche Ansätze aus anderen Forschungsgebieten, die kostengünstige und zeitsparende, bildbasierte Aufnahmetechniken vorschlagen [Santise et al. 2017, S. 229 f.], [Russo et al. 2019, S. 289], [Asadpour 2021, S. 17] liefern Anhaltspunkte für die Übertragung auf die Aktualisierung von Fabrikgebäuden. Grundsätzlich gilt festzuhalten, dass Aktualisierungsansätze

[Antova & Tanev 2020], [Mahami et al. 2019] immer eng mit der Änderungsdetektion [Pučko et al. 2018, S. 27], [Asadi et al. 2019, S. 3], [Zhou et al. 2020, S. 209] verbunden sind. Des Weiteren nimmt die Verwendung von mobilen und handgetragenen Aufnahmegeräten (bild- und entfernungs-basiert) durch die voranschreitende Miniaturisierung immer mehr zu, wovon besonders Scan-to-BIM Ansätze profitieren [Previtali et al. 2020, S. 265]. Aktuelle Scan-to-BIM Ansätze gehen dazu über, anstatt großformatiger Strukturbauteile eines Gebäudes (z.B.: Wände, Decken, Stützen) kleinteilige Elemente der Gebäudetechnik automatisiert aus Punktwolken zum BIM-Modell zu überführen [Adán et al. 2018, S. 138], [Kang et al. 2020, S. 14]. Insgesamt zeigt sich, dass Ansätze aus der Denkmalpflege zur Bestandsaufnahme in Bezug auf die Technologie und deren Methoden bereits sehr ausgereift sind [Baik 2019, S. 15].

Der einzige Ansatz, der geometrische Aktualisierungen innerhalb von Fabriken durchführt, liefert [Shellshear et al. 2015]. Die Aktualisierung basiert hier auf dem wiederholten Einsatz von Laserscannern zur inkrementellen Aktualisierung der Punktwolken von Produktionseinrichtungen [Shellshear et al. 2015, S. 62]. Bildbasierte Aktualisierungsansätze sind im Fabrikkontext mit Bezug auf die geometrischen Gebäudedaten in der Literatur nicht vorhanden. Dies liegt hauptsächlich daran, dass in der Vergangenheit bei photogrammetrischen Berechnungen lange Berechnungszeiten die Regel waren [Kersten & Lindstaedt 2012, S. 38], [Reljić et al. 2019, S. 385]. Demzufolge bieten existierende Aktualisierungsansätze keine Vorgehen unter dem Einsatz von bildbasierten Aufnahmetechniken mittels kostengünstiger Hardware, die zu einer kurzen Aufnahmedauer vor Ort führen und eine inkrementelle und partielle Fortschreibung von Gebäudemodellen ermöglichen (Abb. 16). Zu diesem Ergebnis kommt ebenfalls die zu Aktualisierungsansätzen durchgeführte Literaturanalyse [Hellmuth 2022, S. 215]. Das wesentliche Defizit bei den existierenden Aktualisierungsansätzen liegt somit in der Verwendung von kostenintensiver Hardware, was den Einsatz oftmals unwirtschaftlich werden lässt [Zhang & Arditi 2020, S. 15] und wodurch notwendige Aktualisierungen vernachlässigt werden [Volk et al. 2015, S. 47]. Bei Aktualisierungen, die während des laufenden Betriebs einer Fabrik durchgeführt werden, kommt die Anforderung hinzu, den Betriebsablauf während des Aufnahmeprozesses nicht zu behindern [Shellshear et al. 2015, S. 62]. Um den Betriebsablauf nicht zu beeinträchtigen, muss die Aufnahmezeit vor Ort daher möglichst gering sein.

Für ein kostengünstiges und zeiteffizientes Aktualisierungsverfahren, insbesondere zur Unterstützung des Umbauprozesses von Fabrikgebäuden (Abb. 7), besteht Handlungsbedarf. Der Handlungsbedarf geht aus der Bewertung existierender Forschungsansätze (Abb. 16) anhand der angelegten Bewertungskriterien hervor. Die Bewertungskriterien wiederum leiten sich aus der Zielstellung der vorliegenden Arbeit (Kapitel 1.3) sowie aus den identifizierten Defiziten (Kapitel 3.1) ab. Es existiert demnach kein Aktualisierungsvorgehen, das die Bewertungskriterien erfüllt (Abb. 16).

Die in Kapitel 3.2 analysierten Ansätze zur Identifikation der Auswirkungen von Veränderungen auf das Fabrikgebäude zeigen, dass die Identifikation der betroffenen Fabrikobjekte an die Wechselwirkungen des Systems der Fabrik gebunden ist. Außerdem kann davon ausgegangen werden, dass graphen- und matrixbasierte Modelle für die Identifikation von Interdependenzen und darauf beruhende Auswirkungen geeignet sind [Plehn et al. 2016, S. 482].

Sämtliche existierenden Ansätze weisen jedoch Defizite in Hinblick auf das formulierte Ziel von Methode 2 aus dem Kapitel 1.3 und den davon abgeleiteten Bewertungskriterien (Abb. 16) auf. Insgesamt lassen sich somit zwei wesentliche Defizite aller untersuchten Ansätze zur Thematik „Identifikation von Änderungsauswirkungen“ zusammenfassen:

- Bei der Identifikation der Auswirkungen von Veränderung finden die Elemente des Fabrikgebäudes keine Berücksichtigung (Ausschließliche Betrachtung von Reorganisationen und Rekonfigurationen).
- Die Identifikation der Auswirkungen von Veränderungen erfolgt durch zeit- und arbeitsaufwändige, manuelle Methoden. Eine vollständig automatisierte Identifikation der Auswirkungen von Veränderung erfolgt nicht.

Zwei existierende Ansätze beschränken sich zudem auf Konzepte, die weder implementiert noch validiert wurden [Frankenbach et al. 2020], [Sippl & Reinhart 2021], wodurch keine Aussage zur Zuverlässigkeit der Identifikation von Änderungsauswirkungen möglich ist (Abb. 16).

In den untersuchten Forschungsarbeiten zur Erhebung von Informationsanforderungen für Fabrikumbauplanungen (Kapitel 3.3) sind bei den integrativen Ansätzen keine zweckmäßigen Ansätze nachweisbar. Entweder wird die Anforderungserhebung nicht vertiefend untersucht [Lee et al. 2016, S. 355], [Näser & Wickenhagen 2018, S. 249], [Wu et al. 2022, S. 477] oder berücksichtigen nicht die Besonderheiten digitaler Fabrikgebäudemodelle und der Fabrikumbauplanung [Tolmer 2020], [Wu et al. 2022, S. 475], (Abb. 16). Als Defizit bestehender Ansätze zur Erhebung von Informationsanforderungen ist somit festzuhalten, dass die existierenden Vorgehensweisen zum Einsatz in der Fabrikumbauplanung bezüglich eines digitalen Fabrikgebäudemodells nicht geeignet sind. Keine der betrachteten Forschungsarbeiten erfüllt die angelegten Bewertungskriterien (Abb. 16).

Die in Kapitel 3.4 untersuchten Ansätze zur Informationsbereitstellung und Entscheidungsunterstützung in Rekonfigurationsprozessen bzw. Prozessen der Fabrikumbauplanung zeigen, dass bei Entscheidungsfindungen im fabrikplanerischen Kontext, die bspw. das Fabriklayout betreffen, ausschließlich Informationen zum Produktionssystem berücksichtigt werden. Um Informationen vor Ort in der Fabrik bereitzustellen wird zunehmend auf Augmented Reality gesetzt. Dabei wird bei allen existierenden Ansätzen das Fabrikgebäude isoliert von den Produktionseinrichtungen

betrachtet. Ein holistischer Ansatz, der Informationen des digitalen Fabrikgebäudemodells bereitstellt, um Entscheidungen bei Fabrikumbauplanungen mobil zu unterstützen, existiert nicht (Abb. 16).

		Beurteilungskriterien									
		Methode 1		Methode 2		Methode 3	Methode 4				
		Einsatz kostengünstiger Hardware	Kurzer Aufnahme-prozess vor Ort	Hohe Genauigkeit der Aufnahmeergebnisse	Berücksichtigung von Elementen des Fabrikgebäudes bei Änderungsauswirkungen	Schnelle und aufwandsarme Identifikation von Änderungsauswirkungen	Zuverlässige Identifikation von Änderungsauswirkungen	Strukturierte Informationsanforderungserhebung	Berücksichtigung der Besonderheiten der Informationsanforderungserhebung von Beteiligten der Fabrikumbauplanung	Berücksichtigung von Modellinhalten des Fabrikgebäudes	Mobile Bereitstellung von Modellinhalten
Forschungs- arbeiten	Ansätze zur Aktualisierung von Gebäudemodellen										
	Russo et al. 2019	●	●	○							
	Amer & Golparvar-Fard 2018	●	○	○							
	Adán et al. 2020	○	○	○							
	Shellshear et al. 2015	○	○	○							
Forschungs- arbeiten	Ansätze zur Identifikation der Auswirkungen von Veränderungen auf das Fabrikgebäude										
	Lübke mann 2016				○	○	○				
	Plehn et al. 2016				○	○	○				
	Bauer 2020				○	○	○				
	Frankenbach et al. 2020				○	○	○				
	Sippl & Reinhart 2021				○	○	○				
	Hingst et al. 2022a				○	○	○				
Forschungs- arbeiten	Ansätze zur Erhebung von Informationsanforderungen der Planungsbeteiligten an das digitale Fabrikgebäudemodell										
	Näser & Wickenhagen 2018							○	○		
	Tolmer 2020							○	○		
	Liebich et al. 2013							○	○		
	Lee et al. 2016							○	○		
	Wu et al. 2022							○	○		
Forschungs- arbeiten	Ansätze zur Informationsbereitstellung und Entscheidungsunterstützung										
	Jiang & Nee 2013									○	○
	Kokkas & Vosniakos 2019									○	○
	Tan et al. 2021									○	○

- vollständig erfüllt
- überwiegend erfüllt
- teilweise erfüllt
- kaum erfüllt
- nicht erfüllt / keine Aussage möglich

Abb. 16: Beurteilung der betrachteten Forschungsarbeiten

Insofern existieren in allen vier untersuchten Bereichen deutliche Defizite hinsichtlich der Unterstützung des Prozesses der Fabrikumbauplanung (Abb. 16). Mit Bezug auf die Problemstellung (Kapitel 1.2), in der die industrielle Forschungslücke durch die herausgearbeiteten Defizite festgestellt wurde, lassen die Ergebnisse der Literaturanalyse den Schluss zu, dass derzeit keine geeigneten wissenschaftlichen Methoden zur Beseitigung der Defizite existieren. Dies begründet den Handlungsbedarf zur Entwicklung der Methodik zur Unterstützung der Fabrikumbauplanung unter Verwendung eines aktuellen digitalen Fabrikgebäudemodells. Die Forschungslücke ist als Differenz zwischen den offenen Fragen der Praxis (Kapitel 1.3) und den Lösungsansätzen im Stand der Wissenschaft und Technik (Kapitel 3) anzusehen.

## 4 Konzeption der Methodik zur Unterstützung der Fabrikumbauplanung

Der Fokus bei der Gestaltung der Methodik und den dazugehörigen Methoden liegt auf der Unterstützung der beteiligten Planer, die das komplexe System Fabrik durch die Umbauplanung an neu wirkende Anforderungen anpassen sollen. Beim Umbauprozess (Abb. 7) werden die Planer durch Methoden und Werkzeuge unterstützt. Als Methode wird dabei eine Folge von Schritten bezeichnet, die einen gegebenen Anfangs- in einen gewünschten Endzustand transformiert [Pfohl & Stölzle 1997, S. 127 f.]. Somit geben Methoden Auskunft darüber, wie Aufgaben durchzuführen sind. Die hier zu entwickelnden Methoden zur Fabrikumbauplanung sollen demnach Auskunft darüber geben, wie die Aufgaben zur Umbauplanung unter Verwendung von aktuellen digitalen Fabrikgebäudemodellen durchzuführen sind. Zusätzlich zu den Methoden werden Werkzeuge für die Fabrikplanung verwendet [VDI 5200-1 2011, S. 3]. Werkzeuge, heutzutage in der Regel Software-Werkzeuge, werden zur Informationsgewinnung und -verarbeitung eingesetzt [Lindemann 2009, S. 62]. Damit vermitteln sie eine Hilfestellung bei der praktischen Durchführung der Aufgaben einer Methode [Pfohl & Stölzle 1997, S. 128]. Folglich ist die Kombination einer Methode mit geeigneten Werkzeugen in der Lage, den beteiligten Planern die komplexe Fabrikumbauplanung zielorientiert zu ermöglichen [Aggteleky 1981, S. 30], [REFA 1990, S. 21], [Horváth et al. 2020, S. 205].

Neben der einzelnen Methode wird ein Zusammenschluss verschiedener Methoden als Methodik (Abb. 17) bezeichnet [Lindemann 2009, S. 58]. Die einzelnen Methoden liefern dabei Lösungen für Teilschritte und werden als Methodenkombination in der Methodik zusammengeführt [Lindemann 2009, S. 333]. Innerhalb der Methoden werden zudem Modelle entwickelt. Modelle werden in der vorliegenden Arbeit als vereinfachte Abbilder der Wirklichkeit verstanden, welche die Merkmale der Abbildung, der Verkürzung und des Pragmatismus aufweisen [Stachowiak 1973, S. 131 f.]. Durch die Verwendung der Modelle können Aufgaben durchgeführt werden, die am realen Objekt nur unter großem Aufwand oder mit Einschränkungen im Betrieb verbunden wären [Liewald et al. 2022, S. 608].

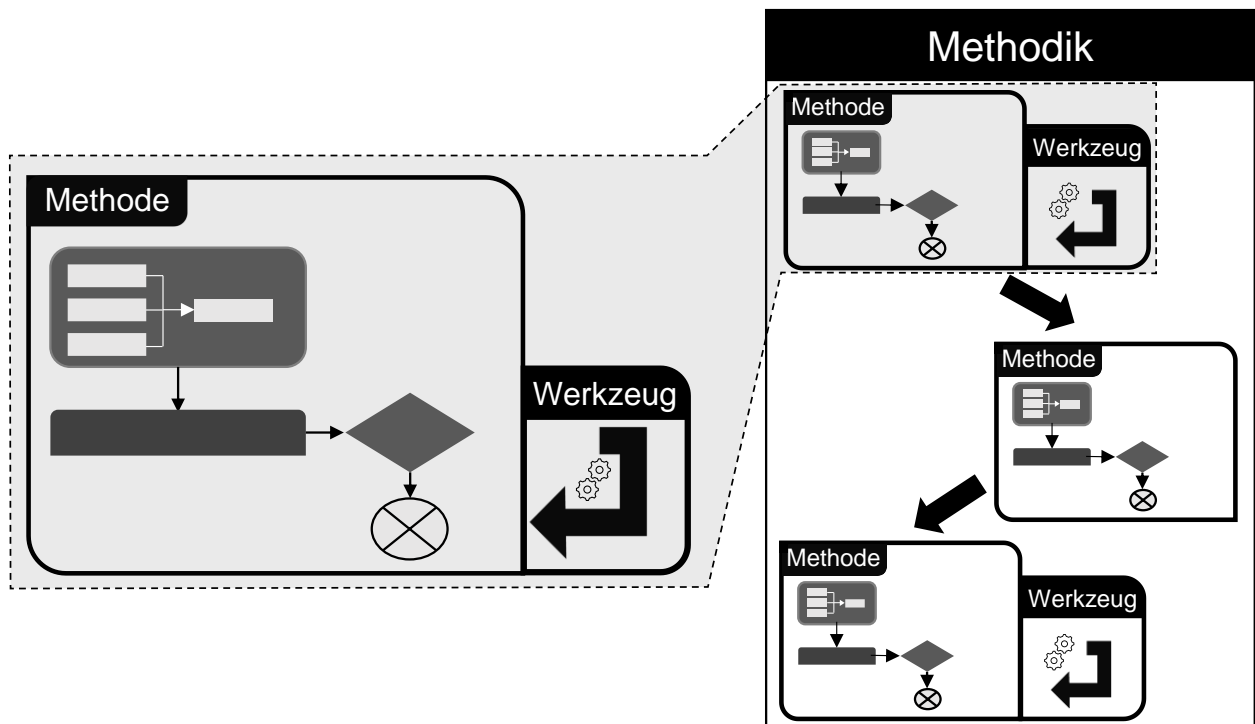


Abb. 17: Methode und Methodik

Zur Überprüfung der Methoden werden diese dem Vorschlag der [VDI 2206 2021] einer Verifikation bzw. Validierung unterzogen. Die Verifikation ist die Bestätigung durch einen objektiven Nachweis, dass die spezifizierten Anforderungen erfüllt sind [VDI 2206 2021, S. 32]. Die Verifikation kann formal erzielt werden [VDI 2206 2004, S. 38]. Die Validierung beinhaltet die „Überprüfung der Systemeigenschaften gegenüber einem vordefinierten Einsatzzweck oder Nutzen“ [VDI 2206 2021, S. 7]. Auf Methoden übertragen, ist hierunter die Bewertung zu verstehen, ob das Vorgehen bezogen auf seinen Einsatzzweck in der Praxis geeignet ist. Hierzu müssen empirisch erhobene Daten aus der Realität mit Daten verglichen werden, die aus den Methoden mithilfe deren Vorgehen oder den abstrakten Modellen entstehen [Rabe et al. 2008, S. 15].

Das Ziel dieses Kapitels liegt in der Konzeption der Methoden, die zur Unterstützung der Fabrikumbauplanung, insbesondere des Umbaus der Fabrikgebäude dienen. Die Methoden werden maßgeblich durch die Defizitbeseitigung und den zu erfüllenden Anforderungen (Abb. 18) aus dem vorherigen Kapitel gestaltet. Dazu werden im ersten Schritt die abgeleiteten inhaltlichen Anforderungen an die zu konzipierende Methodik aufgegriffen und in den Methoden adressiert. Im zweiten Schritt erfolgt die Zuordnung der Methoden zu den Teilprozessen der Fabrikumbauplanung.

## 4.1 Anforderungen an die Methodik zur Unterstützung der Fabrikumbauplanung

Auf Grundlage der Zielsetzung (Kapitel 1.3) sowie den existierenden Defiziten bestehender Forschungsarbeiten werden inhaltliche Anforderungen an die Methodik abgeleitet (Abb. 18). Die an die Methodik gestellten inhaltlichen und somit zielrelevanten Anforderungen (Abb. 18) setzen sich aus den Anforderungen aus der Industrie und den wissenschaftlichen Anforderungen, aus dem Theoriedefizit, zusammen.

Zu unterscheiden und voneinander abzugrenzen sind im Kontext der Anforderungen, die an die Methodik gestellten inhaltlichen Anforderungen und die in Methode 3 zu erfassenden Informationsanforderungen. Die Informationsanforderungen sind Bestandteil der Entwicklung von Methode 3 und definieren den Informationsbedarf, der Beteiligten der Fabrikumbauplanung an das digitale Fabrikgebäudemodell.

Um eine Verifikation und Validierung anhand der zielrelevanten Kriterien zu ermöglichen [Patzak 1982, S. 309 f.], [Döring et al. 2006, S. 18], [Heesen 2014, S. 15–19] werden neben den inhaltlichen Anforderungen auch formale Anforderungen berücksichtigt (Abb. 18). Die formale Anforderung der empirischen Richtigkeit wird dahingehend in die Methode integriert, dass die Systemelemente (Fabrikobjekte, Abb. 9) den realen Aufbau einer Fabrik möglichst umfassend und genau abbilden. Um die formale Richtigkeit einzuhalten, ist die Methodik widerspruchsfrei zu gestalten und die Ergebnisse sollen reproduzierbar sein. Hinsichtlich der einfachen Handhabbarkeit wird die Methodik inhaltlich und zweckbezogen auf Umbauprozesse der Fabrikgebäude zugeschnitten. Außerdem soll die Methodik zur Durchführung einen der Aufgabe angepassten Aufwand vorweisen und eindeutig zu interpretierende Ergebnisse generieren. Bei der Konzeption der Methodik wird darüber hinaus permanent zwischen den Dimensionen Allgemeinheit, Einfachheit und Genauigkeit abgewogen [Weick 2007, S. 54–56].

In Abb. 18 werden ausschließlich die Defizite bestehender Ansätze aufgelistet, für die in der zu entwickelnden Methodik ein Lösungsbaustein konzipiert wird. Die in den betrachteten Ansätzen identifizierten Defizite (Kapitel 3), bspw. der Einsatz kostenintensiver Hardware, werden aufgegriffen und als inhaltliche Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik (Einsatz kostengünstiger Hardware) gestellt (Abb. 18). Wie in bestehenden Ansätzen, wird für die Ergebnisse der Aufnahmeprozesse eine hohe Genauigkeit verlangt (Abb. 18). Zur Erreichung der hohen Genauigkeit müssen geforderte Toleranzen [DIN 18202 2019, S. 11], [DIN 18710-1 2010, S. 9 f.] eingehalten bzw. unterschritten werden.



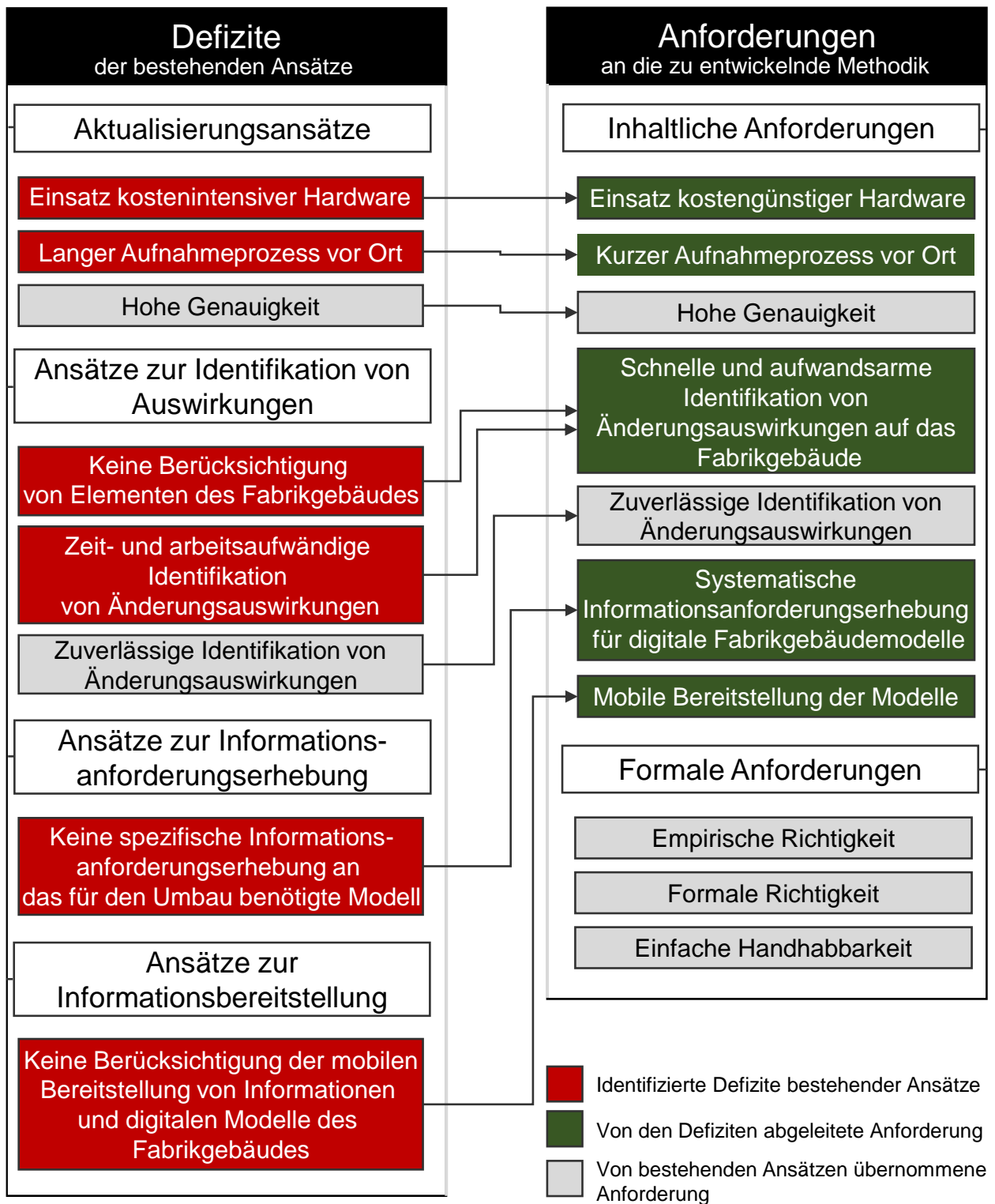


Abb. 18: Ableitung von Anforderungen aus den Defiziten

Die Methodik zur Unterstützung der Fabrikumbauplanung unter Verwendung eines aktuellen digitalen Fabrikgebäudemodells muss somit die Möglichkeit bieten, kurzfristig von der Identifikation der Interdependenzen bis hin zur mobilen Informationsbereitstellung (Abb. 18), Umbaumaßnah-

men, die insbesondere das Fabrikgebäude betreffen, zu unterstützen. Dazu besteht die Anforderung, dass der Aktualisierungsprozess so gestaltet werden muss, dass eine kostengünstige und schnelle Aufnahme vor Ort (Abb. 18) die kleinteilige Aktualisierung des Fabrikgebäudemodells in der Betriebsphase ermöglicht. Die zu entwickelnde Methodik soll nicht nur einen Beitrag für den losgelösten Aktualisierungsprozess liefern. Auch nachgelagerte Prozesse wie die Analyse der Auswirkungen von Veränderungen auf das Fabrikgebäude und die Informationsanforderungserhebung an digitale Fabrikgebäudemodelle zur Klärung der Frage, welche Informationen für die konkrete Fabrikumbauplanung benötigt werden, müssen in der Methodik mitberücksichtigt werden und stringent ineinander einfließen. Dazu ist es erforderlich die Auswirkungen von Veränderungen in der Produktionsplanung auf das Fabrikgebäude durch Wirkbeziehungen schnell und aufwandsarm (Abb. 18) nachvollziehen zu können. Die Informationen, die das digitale Fabrikgebäudemodell für den Umbau beinhalten muss, sollen systematisch erhoben werden. Das systematische Vorgehen zur Erhebung der Informationsanforderungen soll die Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Informationsanforderungen unterstützen. Abschließend wird die mobile Bereitstellung aktueller digitaler Fabrikgebäudemodelle gefordert, was den Zugriff auf die geometrischen Fabrikgebäudemodelle gewährleistet und so die Entscheidungsfindung unterstützt.

#### **4.2 Grobkonzept der Methodik zur Unterstützung der Fabrikumbauplanung**

Der in den vorangegangenen Kapiteln behandelte Prozess der Fabrikumbauplanung sowie dessen defizitäre Prozessschritte lassen sich in einem Regelkreis systematisieren (Abb. 19). Das Regelkreismodell befähigt die zu regelnde Strecke, den Fabrikbetrieb, abstrakt darzustellen und die auf die Fabrik wirkenden Einflüsse in einem geschlossenen Wirkungskreis zu verstehen. Treten Wandlungstreiber (intern und extern) oder Störungen auf, muss die Fabrik entsprechend angepasst bzw. umgebaut werden, um die von der Unternehmensplanung vorgegebenen Sollwerte (Führungsgrößen) zu erhalten (Abb. 19). Wesentliche Bestandteile des Regelkreismodells der Wandlungsfähigkeit einer Fabrik ab der Identifikation der Soll-Ist-Abweichung (Identifikation des Umbaubedarfs, Abb. 19) stellen die Kernbestandteile (1, 2, 3 und 4) der vorliegenden Arbeit dar.

Der Regler leitet den Fabrikumplanungsprozess ein und unterstützt die Fabrikumbauplanung durch (1) das Vorhalten der geforderten Informationen für den Umbau aus dem aktualisierten digitalen Gebäudemodell, (2) die Auswirkungsanalyse zwischen den Fabrikobjekten der Produktion und des Industriebaus sowie (3) der Informationsanforderungserhebung der Umbaubeteiligten (3).

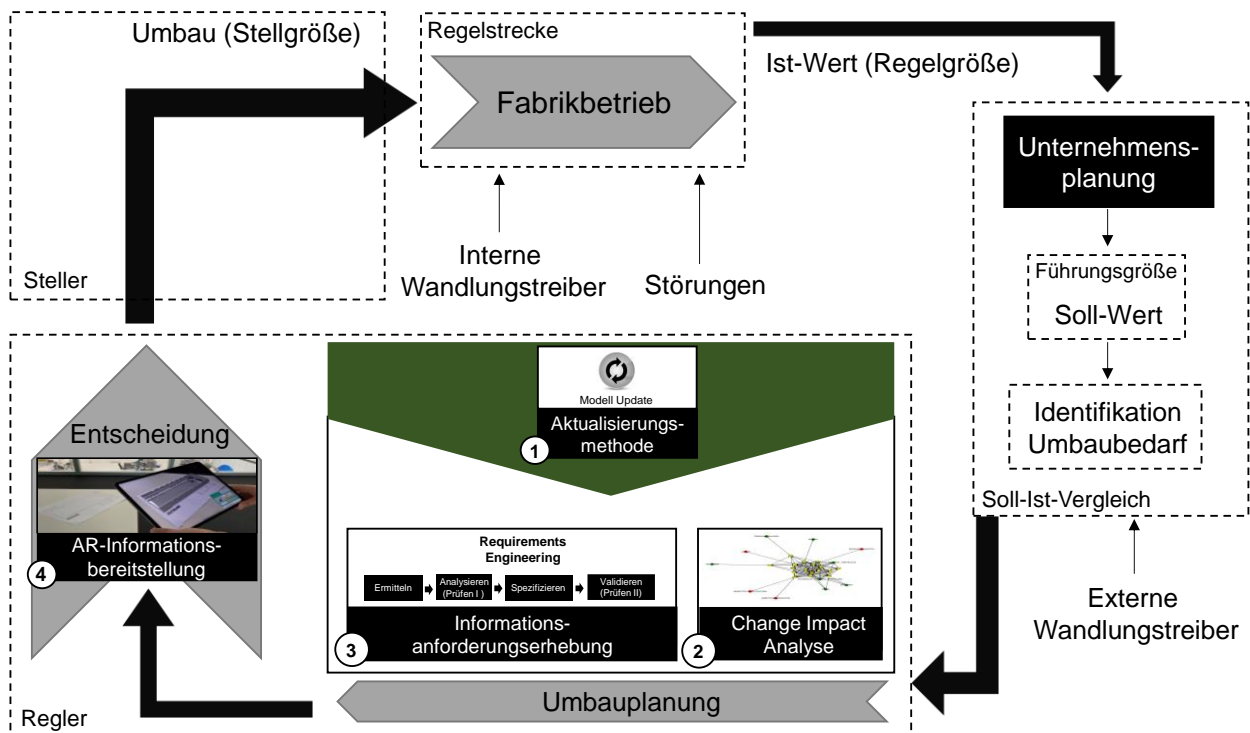


Abb. 19: Regelkreismodell des Umbaus einer Fabrik in Anlehnung an [Heger 2006, S. 27]

Die getroffene Entscheidung hinsichtlich der konkreten Umbaumaßnahmen eines Fabrikumbaus soll auf der Informationsbereitstellung (4) der aktuell vorgehaltenen Punktwolken und BIM-Modelle basieren und die Realisierung des Umbauprozesses einleiten. Die anschließende Realisierung des Umbaus entspricht im Regelkreismodell (Abb. 19) der Stellgröße [Wulf 2011, S. 58]. Die Konzeption der Methodik und somit die Reihenfolge der Methoden folgt dem Ablauf des Regelkreismodells (Abb. 19).

In Abb. 20 erfolgt die Zuteilung der identifizierten Defizite und abgeleiteten Anforderungen aus dem vorherigen Kapitel (Abb. 18) zu den Methoden 1 - 4. Die inhaltlichen Anforderungen stellen die Anforderungen an die Unterstützung des Prozesses der Fabrikumbauplanung dar. Die Methoden grenzen die jeweiligen Teilziele der Unterstützung der Fabrikumbauplanung voneinander ab.

In Methode 1 soll eine Aktualisierungsmethode für digitale Fabrikgebäudemodelle auf Basis der Photogrammetrie entwickelt werden, die während der Betriebsphase zur Aufrechterhaltung der Aktualität der Modellgeometrie dient. Zu den Anforderungen der Aktualisierungsmethode gehört der Einsatz kostengünstiger Hardware, ein zeitlich kurzer Aufnahmeprozess vor Ort und eine hohe Genauigkeit der Aufnahmeergebnisse (Abb. 20), die bei der Aktualisierung der digitalen Fabrikgebäudemodelle erreicht werden soll. Um den Einsatz einer kostengünstigen Hardware zu gewährleisten und einen kurzen Aufnahmeprozess vor Ort einzuhalten (Abb. 20), kommen im Aktualisierungsprozess Smartphones zur Anwendung.

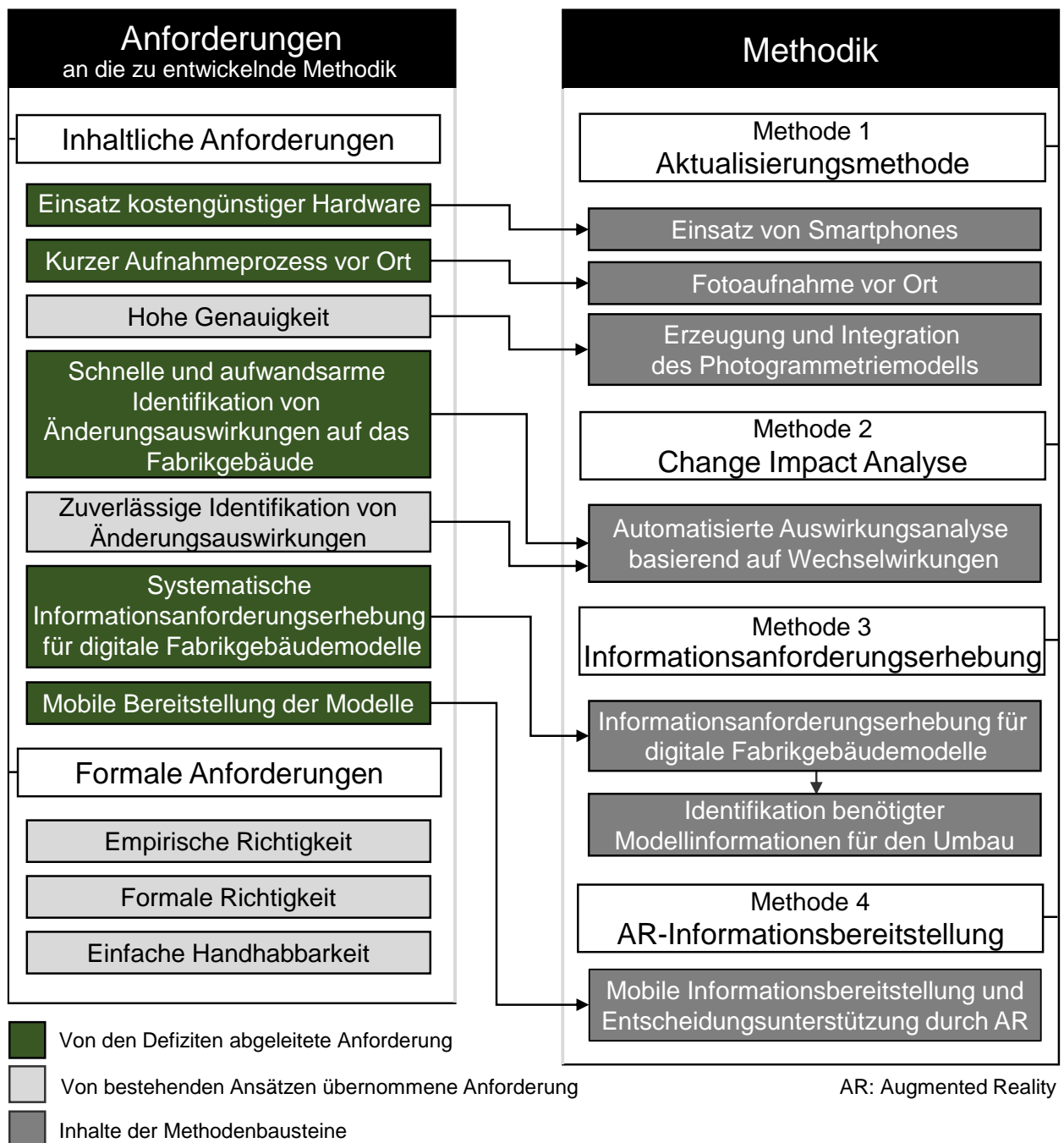


Abb. 20: Zuordnung der Anforderungen zu den Methoden

Der Methode 2 (Change Impact Analyse) wird die automatisierte Analyse der Wechselwirkungen zwischen der Produktions- und Industriebauplanung und der anschließenden Identifikation von Auswirkungen auf das Fabrikgebäude zugewiesen (Abb. 20). Anforderungen an die methodische Unterstützung sind hierbei, dass die Auswirkungen schnell und aufwandsarm ausgegeben werden und die Auswirkungen auf das Fabrikgebäude inbegriffen sind. Um der schnellen und aufwandsarmen Identifikation von Auswirkungen gerecht zu werden, erfolgt die Entwicklung einer automatisierten Change Impact Analyse. Inhaltliche Grundlage dafür sind bestehende Wirkbeziehungen, die aus existierenden Forschungsarbeiten hervorgehen.

Als Anforderung an die methodische Unterstützung wird in Methode 3 die systematische Informationsanforderungserhebung gestellt, welche die Besonderheiten der Informationsanforderungen aus der Produktions- und Industriebauplanung an ein digitales Fabrikgebäudemodell berücksichtigt. Dementsprechend wird eine Methode zur Informationsanforderungserhebung vorgeschlagen, die es allen Beteiligten am Fabrikumbauprozess ermöglicht, Informationsanforderungen strukturiert an das für den Umbau benötigte digitale Gebäudemodell zu stellen (Abb. 20). Das Informationsanforderungsmanagement bildet die Grundlage zur Festlegung der für den Umplanungsfall benötigten Informationen und für die Auswahl des geeigneten Fabrikgebäudemodells. Die Methodik abschließend wird mithilfe von AR in Methode 4 (Abb. 20) der Zugriff auf aktualisierte digitale Fabrikgebäudemodelle mobil bereitgestellt. Als Anforderung an die methodische Unterstützung von Methode 4 wird die mobile Informationsbereitstellung der Fabrikgebäudedaten vor Ort in der Fabrik formuliert. Die Fabrikgebäudemodelle unterstützen vor Ort die Planer bei der Entscheidungsfindung bspw. während des Vergleichs von Umplanungsvarianten hinsichtlich der Kosten und Bauzeit (Abb. 20).

Vor dem Hintergrund, dass die Methodik auf Prozesse der Fabrikumbauplanung innerhalb einer Fabrik zugeschnitten ist und diese unterstützen soll, gilt es, die kurzfristigen technischen, organisatorischen und strukturellen Handlungsspielräume eines Produktionssystems zu beachten [Neumann 2014, S. 80]. Diese situationsbasierten Adaptionen mit sehr kurzem Zeithorizont [Neumann 2014, S. 100], die nur Auswirkungen auf das Produktionssystem (Reorganisationen und Rekonfigurationen) haben, sind nicht Bestandteil der zu entwickelnden Methodik. Wenn kurzfristige Adaptionen nicht mehr ausreichen und umfangreichere Umbaumaßnahmen notwendig werden, die auf technologische und strukturelle Anpassungen abzielen, in die das Fabrikgebäude einbezogen wird, kommt die zu entwickelnde Methodik hingegen zum Tragen. Dazu gehört bspw. die Anpassung der technischen Gebäudeausrüstung an die neuen Anforderungen, die von modernisierten Produktionsmitteln ausgehen.

#### **4.3 Allokation der zu entwickelnden Methoden zur Unterstützung des Prozesses der Fabrikumbauplanung**

Die zu entwickelnde Methodik soll durch die Anwendung der einzelnen Methoden den Umbauprozess unterstützen und übergeordnet einen Beitrag zur Reduktion der für den Fabrikumbauplanungsprozess benötigte Zeitdauer liefern. Die vorgelagerte Identifikation des Umbaubedarfs (Wahrnehmung, Abb. 21) innerhalb einer Fabrik ist nicht Bestandteil der Methodik. Erst ab der Entscheidung Umbaumaßnahmen durchzuführen, sollen die unterstützenden Methoden zum Einsatz kommen (Abb. 21).

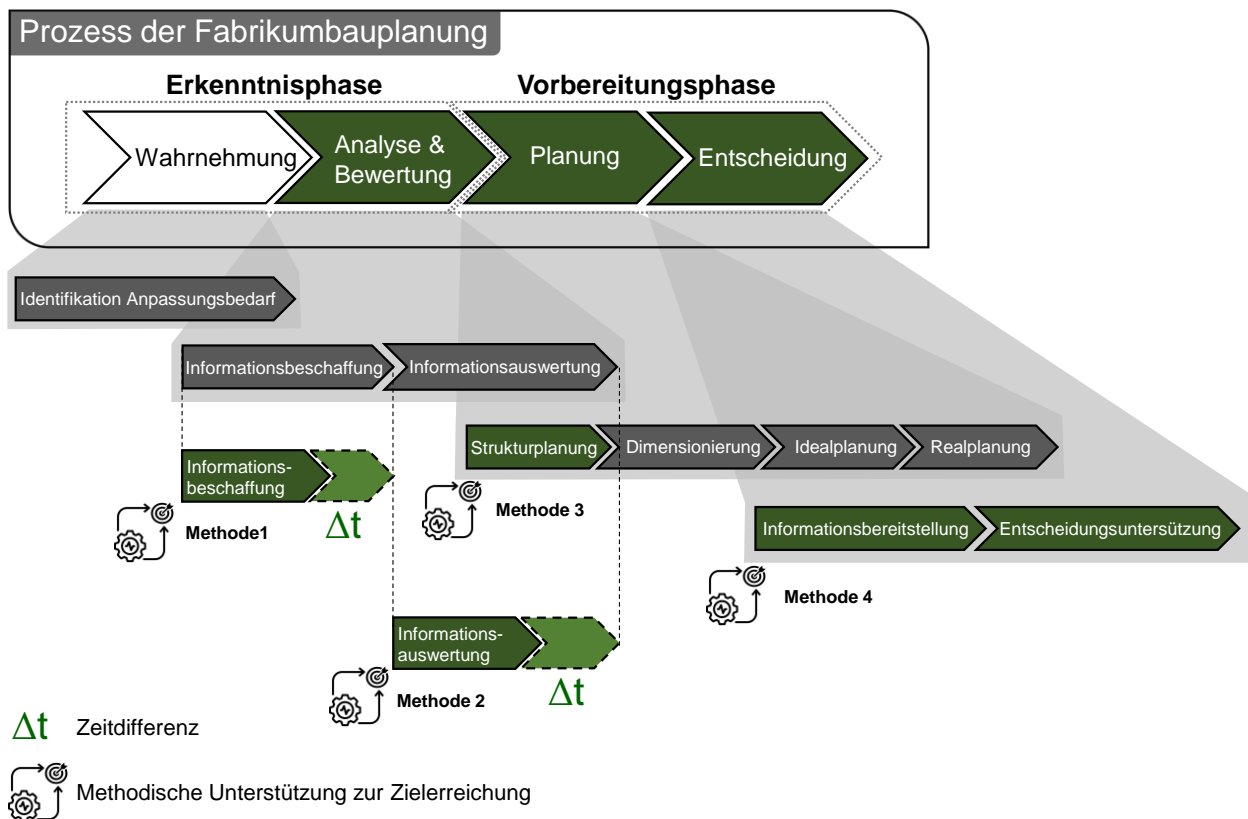


Abb. 21: Gesamtdarstellung aller Prozessschritte, in denen die Methoden in Bezug auf die Zielerreichung unterstützen

Mit Methode 1 (Aktualisierungsmethode) soll das digitale Fabrikgebäudemodell während des Betriebs der Fabrik kontinuierlich aktuell gehalten werden. Zur Erhöhung der Veränderungsgeschwindigkeit (vgl. Kapitel 2.1.2) werden beim Prozessschritt der Informationsbeschaffung (Abb. 21) die aktuellen Gebäudegeometrien bereitgestellt (Methode 1, Abb. 21). Sie liefern eine verlässliche Datengrundlage und machen die zeitaufwändige ad hoc Datenerfassung obsolet. Eine Verkürzung des Prozesses der Umbauplanung soll daher durch „Eliminieren der Datenerfassung“ (Kapitel 2.1) erreicht werden [Schlick et al. 2018, S. 662]. Der Abb. 21 ist anzumerken, dass der Aktualisierungsprozess kleinteilige Gebäudeänderungen während des Fabrikbetriebs iterativ aktualisiert. Damit findet der Aktualisierungsprozess dem eigentlichen Umbauprozess vorgelagert statt und eliminiert so die vormalige Informationsbeschaffung während des Prozesses der Fabrikumbauplanung hinsichtlich geometrischer Daten des Fabrikgebäudes.

Anschließend identifiziert Methode 2 (Change Impact Analyse) die Auswirkungen der Veränderungen auf das Fabrikgebäude. Durch die automatisierte Identifikation von Änderungsauswirkungen ist es das Ziel zuvor manuell ausgeführte Prozesse zu unterstützen. Als Resultat wird eine Reduktion der benötigten Zeitdauer für die Informationsauswertung (Abb. 21) angestrebt. Mit Methode 3 (Informationsanforderungserhebung) werden die für den Umbau des Fabrikgebäudes benötigten Informationen während der Strukturplanung (Abb. 21) ermittelt. Anschließend sollen

zur Informationsbereitstellung (Methode 4) während der Entscheidungsphase (Abb. 21) aktuelle digitale Fabrikgebäudemodelle eingesetzt werden.

Wesentliches Teilziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, in Methode 1 ein effizientes Vorgehen zur kontinuierlichen Aktualisierung von digitalen Fabrikgebäudemodellen bzw. der Digitalisierung von Fabrikgebäuden zu entwickeln. Der Begriff der „Digitalisierung“ steht in diesem Kontext für die Fortschreibung realer Änderungen der Gebäudestruktur in die informationstechnische bzw. geometrische Repräsentation in Form von Punktwolken und BIM-Modellen. Die Möglichkeit in bestehenden Fabriken auf aktuelle Planunterlagen des Gebäudes zurückzugreifen, erlauben es, die im Gegensatz zu den Greenfield-Projekten wesentlich komplexeren Brownfield-Projekte [Günther 2015, S. 177] effizient zu unterstützen.

#### **4.4 Zwischenfazit**

Zur Konzeption der Methodik zur Unterstützung der Fabrikumbauplanung werden zunächst die inhaltlichen und formalen Anforderungen an die Methodik abgeleitet und zusammengefasst (Abb. 18). Die inhaltlichen Anforderungen folgen der Zielsetzung der Arbeit und resultieren aus den Defiziten bestehender Ansätze (Kapitel 3). Die inhaltlichen Anforderungen zielen somit auf den Abbau der ermittelten industriellen und wissenschaftlichen Defizite ab. Technische Weiterentwicklungen der Photogrammetrie und deren Aufnahmegерäte fließen zusätzlich in die Konzeption des Lösungsansatzes mit ein. Auf Basis der Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik wird das Grobkonzept der unterstützenden Fabrikumbauplanung (Kapitel 4.2), bestehend aus 4 Methoden, entwickelt (Abb. 20). Dazu wird vorgeschlagen, den Prozess der Fabrikumbauplanung (Abb. 21) methodisch bei der Zielerreichung der Teilprozessschritte zu unterstützen und die Veränderungsgeschwindigkeit durch die Bereitstellung aktualisierter digitaler Fabrikgebäudemodelle zu erhöhen. Die Aktualisierungsmethode wird als wesentlicher Bestandteil der Methodik durch die Methoden der Change Impact Analyse, der Informationsanforderungserhebung und Informationsbereitstellung vor Ort in den Prozess der Fabrikumbauplanung eingebettet. Im nachfolgenden Kapitel werden, die in Kapitel 4 konzipierten Methoden für die unterstützende Methodik der Fabrikumbauplanung, im Detail entwickelt.

## 5 Detaillierung der Einzelmethoden

Im Folgenden werden die in Kapitel 4.2 vorgestellten Methoden zur Unterstützung der Fabrikumbauplanung, die zusammen ein Vorgehen zur Zielerreichung (vgl. Kapitel 1.3) bilden, detailliert ausgearbeitet. Die als Hilfsmittel für die Methoden 1, 2 und 4 benötigten Softwarewerkzeuge, werden ebenfalls entwickelt und beschrieben.

### 5.1 Methode 1: Aktualisierungsmethode für digitale Fabrikgebäudemodelle

In diesem Kapitel wird ein Aktualisierungsansatz entwickelt, der darauf abzielt, die Aktualisierung digitaler Gebäudemodelle von Fabrikgebäuden in Form von Punktwolken und BIM-Modellen zu ermöglichen. Das Hauptaugenmerk liegt hierbei auf der Aufnahme kleinteiliger Objekte zur partiellen Aktualisierung des Fabrikgesamtmodells. Bei der Ausarbeitung der Methode werden die Forderungen (Kapitel 4.1) nach dem Einsatz von kostengünstiger Hardware, einem kurzen Aufnahmeprozess vor Ort und einer hohen Genauigkeit des Aktualisierungsprozesses einbezogen.

Obwohl in der Vergangenheit photogrammetrische Berechnungen für die Erfassung von Bestandsdaten in einer Fabrik oftmals als zu zeitaufwändig eingestuft wurden [Bracht et al. 2018, S. 264], lässt der technische Fortschritt die Rechenleistung von Grafikkarten (GPU) stetig wachsen [Huang et al. 2019, S. 9043]. Als Folge reduziert sich die Berechnungszeit der Modellerstellung für photogrammetrische Modelle kontinuierlich, womit diese Technologie für die Praxis immer relevanter wird und deshalb in der vorliegenden Arbeit zum Einsatz kommen soll. Die Nachbearbeitung bzw. Modellerstellung ist bei der Photogrammetrie maßgeblich durch die Rechenkapazitäten des verwendeten PCs und die in der Software herangezogenen Algorithmen wie SfM, MVS oder der Scale-invariant feature transform Algorithmus (SIFT) abhängig [Henze 2015, S. 60], [Chatzifoti 2016, S. 96]. Diese beiden Einflussfaktoren werden in der vorliegenden Arbeit nicht adressiert. Stattdessen steht die Reduktion der Aufnahmezeit vor Ort im Mittelpunkt, um anschließend ein aktuelles geometrisches Abbild der Produktionsstätte zu liefern. Dadurch lassen sich Umplanungen von bestehenden Produktionssystemen, die Einfluss auf die Gestaltung des Fabrikgebäudes haben und dort wiederum Anpassungen auslösen, von Anfang an auf einer verlässlichen Planungsbasis durchführen.

Es wird davon ausgegangen, dass anfänglich eine initiale Gesamtpunktwolke der Fabrik, erfasst durch Laserscans, existiert und ein BIM-Modell aus der Planungsphase bzw. nach der Ausführungsphase (Abb. 12) vorliegt. Die Gesamtpunktwolke des Fabrikgebäudes soll während der Betriebsphase (Abb. 12) aktuell gehalten werden, um diese anschließend für die Aktualisierung des



BIM-Modells verwenden zu können. Um das digitale Fabrikgebäudemodell kostengünstig und durch eine schnelle Aufnahme vor Ort zu aktualisieren, werden Änderungen von Gebäudekomponenten (z.B. Gebäudetechnik) photogrammetrisch erfasst, in die Gesamtpunktwolke integriert und damit aktualisiert. Die Aktualisierungsmethode umfasst die Teilschritte „Änderungsdetektion“, „Aktualisierungsprozess Punktwolke“ und „Aktualisierungsprozess BIM-Modell“, die nacheinander abgestuft und beschrieben werden.

Grundsätzlich können bei der Änderungsdetektion drei Formen von Veränderungen der Gebäudestruktur (Primär-, Sekundär-, Tertiär- oder Quartärstruktur), die sich durch die Nutzungsdauer und der Systemperspektive (z.B. Bauwerk, Gebäudetechnik etc.) voneinander abgrenzen, unterschieden werden:

- Ergänzen von Bauteilen (der Primär-, Sekundär-, Tertiär- oder Quartärstruktur)
- Entfernen von Bauteilen (der Primär-, Sekundär-, Tertiär- oder Quartärstruktur)
- Veränderung / Austausch von Bauteilen (der Primär-, Sekundär-, Tertiär- oder Quartärstruktur)

Eine Änderungsdetektion in Innenräumen von Fabrikgebäuden kann entweder manuell durch Begehungen und Abgleich mit Planunterlagen oder durch automatisierte Änderungsdetektionsverfahren erreicht werden (Abb. 22).

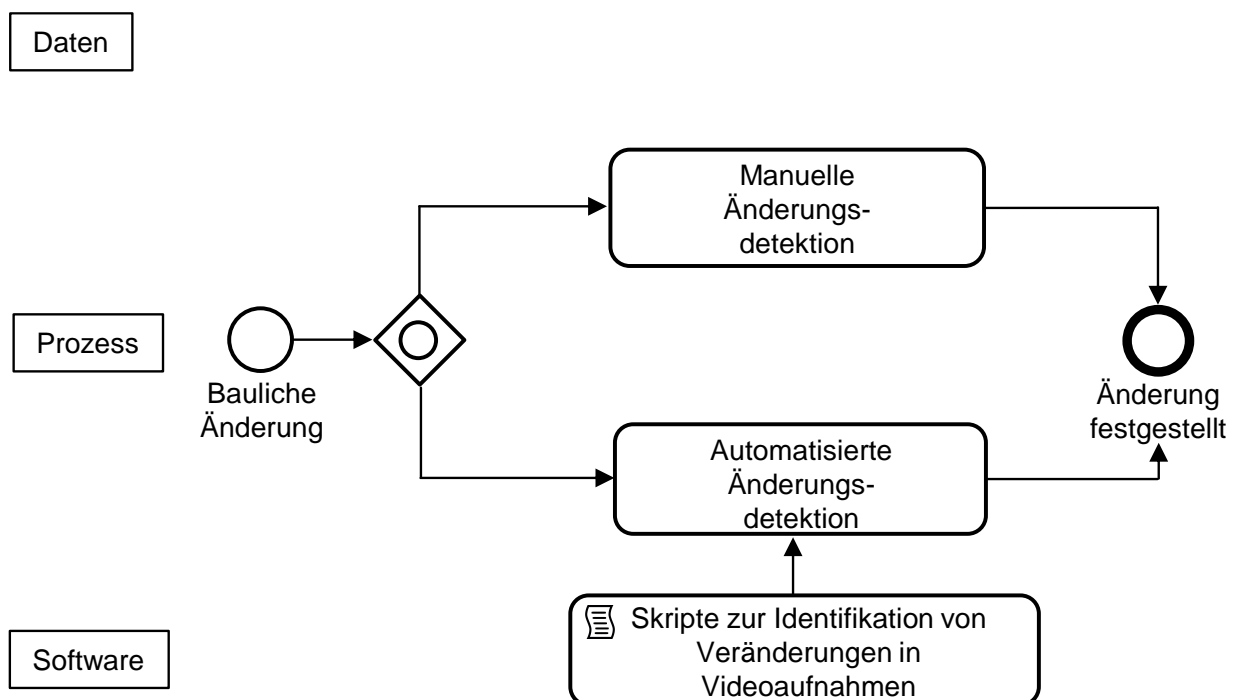


Abb. 22: Prozessdarstellung der Änderungsdetektion

Zur Änderungsdetektion wird im Gegensatz zu den aufwändigen manuellen Begehungen eine automatisierte Änderungsdetektion vorgeschlagen. Da bisher keine Ansätze zur geometrischen Änderungsdetektion in Fabrikgebäuden existieren (Anhang C), wird im Folgenden explorativ vorgegangen. Grundsätzlich kommen Verfahren in Betracht, die einen Punktwolke-zu-Punktwolke-Vergleich durchführen oder auf Bilderkennung basieren. Aufgrund des hohen Aufwands, der Aufnahme und des anschließenden Vergleichs von zwei zu verschiedenen Zeitpunkten aufgenommenen Punktwolken des gesamten Fabrikgebäudes, wird in der vorliegenden Arbeit die Bilderkennung zur Änderungsdetektion als Ansatz verfolgt.

Um eine bauliche Veränderung des Gebäudes durch Bilderkennung identifizieren zu können, erfordert dies eine Videoüberwachung der Räume, in denen die Änderungsdetektion durchgeführt werden soll. Als grundlegender Ansatz wird ein Softwarewerkzeug konzipiert und entwickelt, um Computer Vision mit einer Objekterkennung für die Änderungsdetektion einzusetzen. Nachfolgend werden die für das Softwarewerkzeug verwendeten Ressourcen beschrieben.

Für das Softwarewerkzeug zur Änderungsdetektion wird die Open Source Plattform für maschinelles Lernen TensorFlow Version 1.12 mit Python 3.5 von der Distributionsplattform Anaconda eingesetzt. Zudem werden verschiedene Skripte zur Reduktion der Bildgröße [Nagarajan 2020] verwendet, um die Trainingszeit des Modells zu reduzieren. Außerdem werden Datensätze zur Erzeugung von TensorFlow Record Dateien [Tran 2017] eingesetzt. Das erzeugte TensorFlow Record Dateiformat ist das binäre Speicherformat der TensorFlow Plattform für maschinelles Lernen. Das binäre Dateiformat verkürzt ebenfalls die Trainingszeit des Modells, da binäre Dateien weniger Speicherplatz auf der Festplatte benötigen und schneller geladen werden können. Zur Verwendung des Softwarewerkzeugs zur Änderungsdetektion muss zunächst das Objekt, das erkannt werden soll, in einem Datensatz (mehrere hundert Bilder) erfasst und anschließend mit „LabelImg“ annotiert werden. „LabelImg“ ist ein quelloffenes grafisches Werkzeug [Tkachenko et al. 2022] zur Kennzeichnung von Bildern, um die Objekterkennung durch einen Objektbegrenzungsrahmen zu visualisieren. Nachdem das Modell trainiert ist, wird ein Inferenzgraph erstellt, der zur Anwendung des Modells benötigt wird. Der Inferenzgraph enthält v.a. den Klassifikator, der für die Objekterkennung notwendig ist.

Wird in einem Raum der Fabrik (z.B. Technikzentrale), der mit einem Videoüberwachungssystem ausgestattet ist, ein Bauteil (z.B. Ventilator der Raumlufthechnischen (RLT) Anlage) ausgetauscht, soll die Änderung automatisiert erkannt und eine Aktualisierung des Fabrikgebäudemodells angestoßen werden (Abb. 22).

Ziel dieser Vorgehensweise ist es, dauerhafte bauliche Änderungen zu identifizieren. Kurzfristige und temporäre Änderungen sollen dagegen keine Aktualisierung des digitalen Fabrikgebäude-modells auslösen. Im Softwarewerkzeug kann daher eingestellt werden, ab welcher Zeitspanne seit der Detektion der Veränderung von einer dauerhaften baulichen Veränderung auszugehen

ist. Eine prototypische Umsetzung der Änderungsdetektion erfolgt im Kapitel 6 (Verifikation und Validierung der Methodik), um zu überprüfen, ob Computer Vision grundsätzlich zur Änderungsdetektion bei der Aktualisierung für digitale Fabrikgebäudemodelle in der Fabrikplanung geeignet ist.

Nachdem eine bauliche Änderung identifiziert ist, wird zur Erreichung der Zielstellung der vorliegenden Arbeit, ein Prozess vorgeschlagen, der die Gesamtpunktwolke des Fabrikgebäudes aktuell hält. Diese Gesamtpunktwolke wird anschließend für die Aktualisierung des BIM-Modells verwendet. Der nachfolgend vorgeschlagene Aktualisierungsprozess zielt auf kleinteilige Änderungen des Fabrikgebäudes während des Fabrikbetriebes ab. Bei umfangreichen Gebäudeveränderungen wird dagegen weiterhin eine Neuaufnahme durch einen Laserscanner empfohlen. Kleinteilige, bauliche Veränderungen des Fabrikgebäudes in der Betriebsphase treten jedoch deutlich häufiger auf und werden daher in der vorliegenden Arbeit in den Fokus gestellt.

Der Prozess zur Aktualisierung von Punktwolken beginnt nach der Identifikation von Veränderungen (Abb. 22) mithilfe der kontaktfreien Bestandserfassungsmethode „Photogrammetrie“ (Abb. 13) durch die Planung des Aufnahmeschemas (Abb. 23). In diesem ersten Schritt wird geplant, wie das zu erfassende Objekt, das von der Veränderung betroffen ist, aus verschiedenen Perspektiven fotografiert werden kann. Dies ist notwendig, um für den nachfolgenden Photogrammetrieprozess (vgl. Kapitel 2.2) verwertbare Fotos zu erhalten. Ein Beispiel für die Planung des Fotografie-Schemas für ein teilweise freistehendes Objekt (z.B. an einer Wand stehendes Objekt) zeigt Abb. 24. (links).

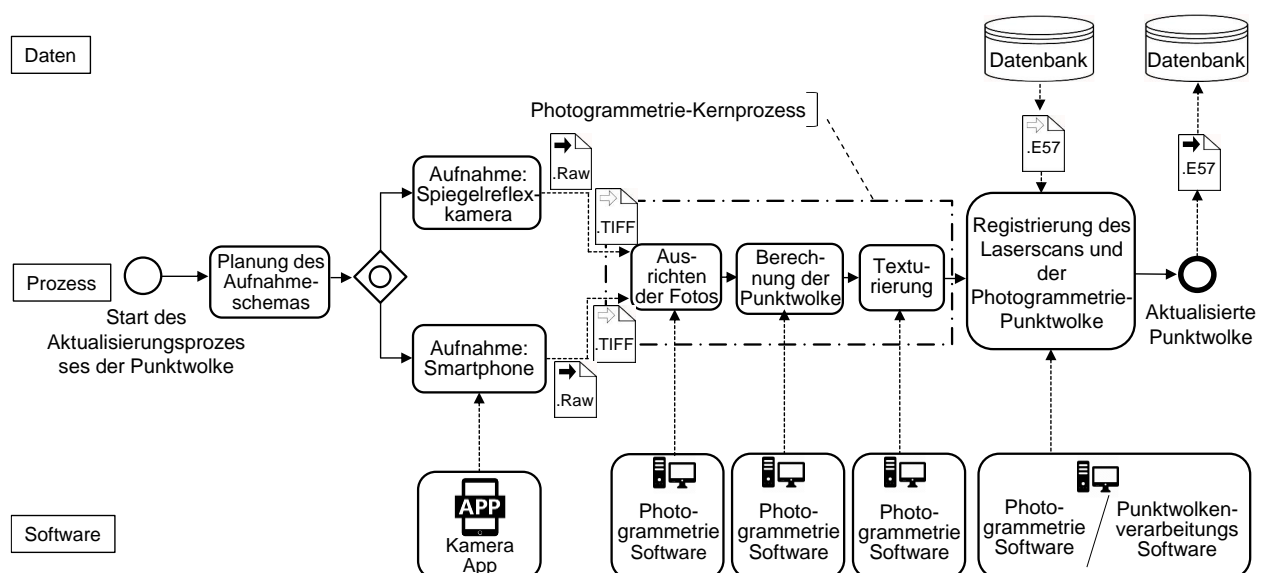


Abb. 23: Prozessdarstellung zur Aktualisierung einer Punktwolke

Es ist vorgesehen, dass bogenförmig auf verschiedenen Höhen und somit aus verschiedenen Perspektiven Fotos vom Objekt erfasst werden. Rechts sind die auf der Planung basierenden

Kamerapositionen des Beispielobjekts zu sehen. Die Planung des Fotografie-Schemas bietet sich bei komplexen Aufnahmesituationen an. Bei einfachen Aufnahmesituationen kommt ein erfahrener Vermessungsingenieur auch ohne eine eigens dafür durchgeführte Planung aus.

Für die Aufnahme können Spiegelreflexkameras oder Smartphones mit integrierter Kamera eingesetzt werden (Abb. 23). Bisher werden hauptsächlich Spiegelreflexkameras für die Photogrammetrie eingesetzt. Aufgrund der Entwicklung von Smartphone-Kameras [Ribeirinho et al. 2020, S. 441] sollen in dem vorgeschlagenen Aktualisierungsprozess auch kostengünstige Smartphones für die Aufnahme verwendet werden. Die wesentlichen Kameraeinstellungen wie Blendenöffnung, Belichtungszeit und ISO-Wert müssen je nach Umgebungsbeleuchtung bei der Aufnahme angepasst und möglichst für die gesamte Dauer der Aufnahme beibehalten werden. Um die genannten Kameraeinstellungen auch für ein Smartphone festlegen zu können, ist eine professionelle Kamera-App (Abb. 23) zu verwenden.

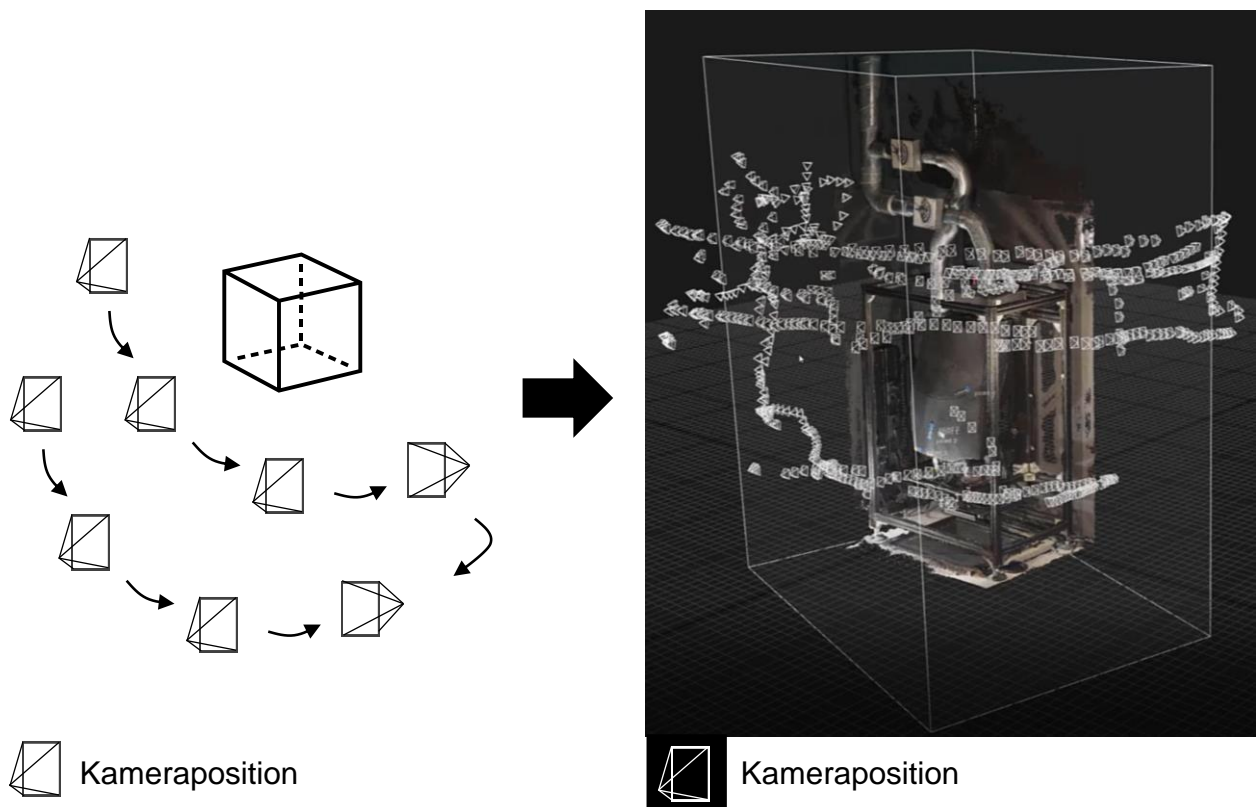


Abb. 24: Beispiel einer Planung (links) und Durchführung (rechts) zur Erfassung eines teilweise freistehenden Objektes

In der späteren Validierung (Kapitel 6) kommen verschiedene Geräte (Spiegelreflexkameras und Smartphones) für den Aufnahmeprozess zum Einsatz, um deren Ergebnisse mit der Aufnahme eines Laserscanners vergleichen zu können. Unabhängig vom Aufnahmegerät werden die ent-

standenen Fotos im Aktualisierungsprozess der Punktwolke für den photogrammetrischen Kernprozess verwendet (Abb. 23). Der photogrammetrische Kernprozess enthält die Schritte Ausrichten der Fotos, Berechnung der Punktwolke und Texturierung (Abb. 23).

Beim Ausrichten der Fotos werden gemeinsame, in den Fotos auftauchende Geometrien und Punkte identifiziert und die Position der Kamera während des Aufnahmezeitpunktes durch Bündelausgleichung berechnet (Mehrbildphotogrammetrie, vgl. Kapitel 2.2). Deshalb muss bereits bei der Aufnahme (Abb. 23) beachtet werden, dass sich aufgenommene Objekte zweier Fotos ca. 30 % bis 90 % überlagern [Blankenbach 2016, S. 15], um eine automatisierte Ausrichtung durchführen zu können. Zusätzlich erfolgt die Bestimmung der Kamerakalibrierung, zu welcher bspw. die Kamerakonstante, die Hauptkoordinaten und die Verzeichnungsparameter gehören. Zur anschließenden Berechnung der Punktwolke werden unterschiedliche Algorithmen verwendet. Bewährte photogrammetrische Algorithmen sind der SfM, MVS und der simultaneous localization and mapping (SLAM) Algorithmus (Kapitel 2.2). Es wird an dieser Stelle auch darauf hingewiesen, dass für die einzelnen Teilschritte des photogrammetrischen Kernprozesses (Abb. 23) jeweils spezifische Algorithmen zum Einsatz kommen. Je nach eingesetzter Photogrammetrie-Software (z.B.: Agisoft Metashape/ PhotoScan, Meshroom, RealityCapture etc.) kommen variierende Algorithmen zum Einsatz. Die Berechnung der dreidimensionalen Objektpunkte bei der Mehrbildphotogrammetrie erfolgt bspw. durch den räumlichen Vorwärtsschnitt [Luhmann & Maas 2016, S. 32 f.]. Eine Auflistung von Algorithmen, die sich der Rekonstruktion im Bereich der Multi-View-Stereo-Aufnahme von Gebäuden eignen, liefert [Tuttas 2017, S. 17]. Der letzte Schritt der photogrammetrischen Rekonstruktion ist die Texturierung (Abb. 23). Hier werden die berechneten Geometrien (3D) der aufgenommenen Gebäudeobjekte mit den fotorealistischen Texturen (2D) überlagert.

Nachdem die Punktwolke des Gebäudebauteils, was die Aktualisierung beinhaltet, photogrammetrisch erstellt ist, erfolgt die Registrierung mit der aus dem initialen Laserscan stammenden Gesamtpunktwolke des Gebäudes (Abb. 23). Der finale Schritt der Registrierung kann je nach eingesetzter Softwareanwendung in der Photogrammetrieanwendung oder in einer dafür geeigneten Punktwolkenverarbeitungssoftware durchgeführt werden (Abb. 23). Die Gesamtpunktwolke des Gebäudes wird dazu aus der Datenbank heruntergeladen. Dafür wird in der Regel das E57-Dateiformat verwendet, was dem Standardaustauschformat für Punktwolken entspricht. Mit Hilfe von Kontrollpunkten wird die Photogrammetriepunktwolke in der richtigen Orientierung und Skalierung in die Gesamtpunktwolke des Gebäudes (Laserscan) eingefügt und als aktualisierte Gesamtpunktwolke wieder in der Datenbank gespeichert (Abb. 23). Die hier genannte Datenbank stellt die in vielen Richtlinien und Verordnungen als Common Data Environment (CDE) bezeichnete gemeinsame Datenumgebung dar [DIN EN ISO 19650-1 2019, S. 1]. Die partielle Aktualisierung der Punktwolke ist damit abgeschlossen.

Die aktualisierte Punktwolke wird anschließend zur Unterstützung bei der Aktualisierung des BIM-Modells verwendet (Abb. 25). In der hier vorgeschlagenen Methode wird die Aktualisierung des BIM-Modells als manueller Prozess durchgeführt. Zwar existieren Ansätze, die BIM-Modelle automatisch aus Punktwolken generieren, um die zeitaufwändige manuelle Modellierung obsolet zu machen. Diese Konzepte sind jedoch oftmals noch nicht praxistauglich, um ohne Qualitätsverlust und ohne umfangreiche Nacharbeit eingesetzt zu werden.

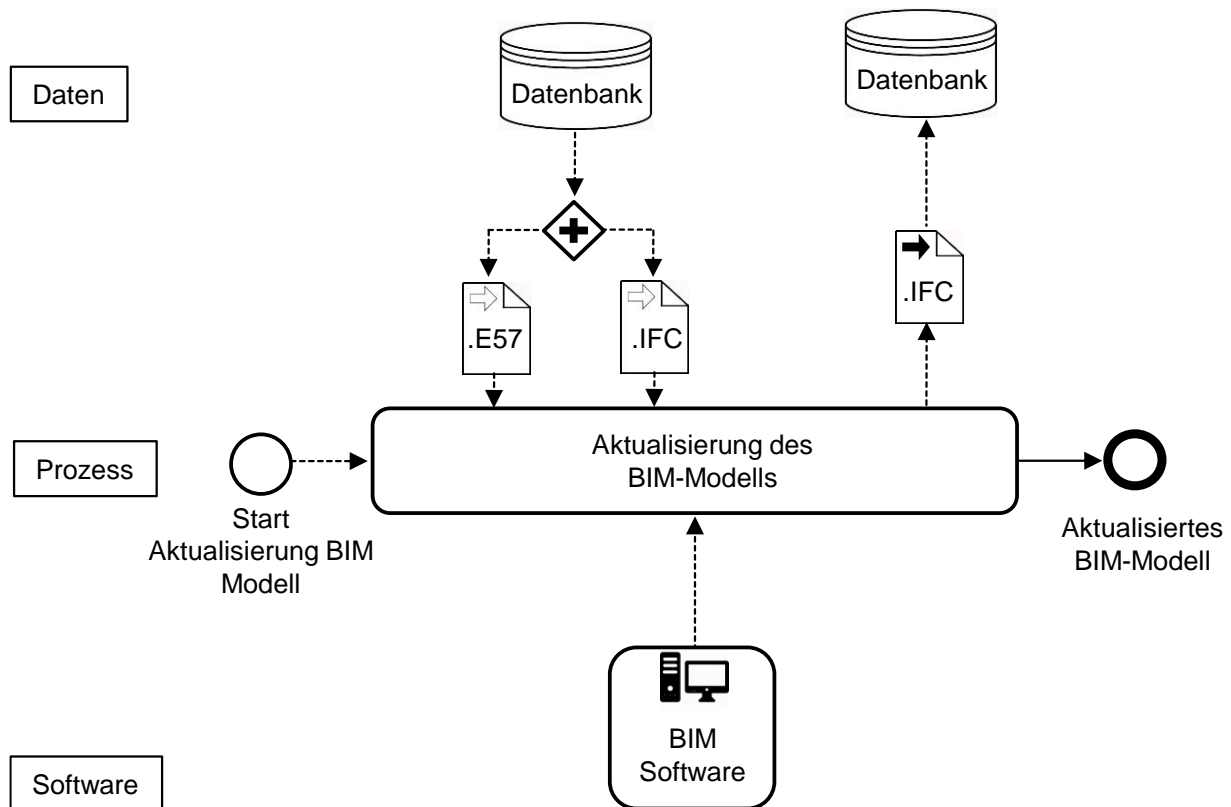


Abb. 25: Prozessdarstellung zur Aktualisierung eines BIM Modells

Abb. 25 zeigt die schematische Vorgehensweise des BIM-Aktualisierungsprozesses unter Verwendung der aktualisierten Punktwolke aus der Datenbank. Zur Unterstützung des manuellen Modellierungsprozesses wird die aktualisierte Punktwolke direkt in die BIM-Software geladen oder mit Hilfe von Plugins (z.B. PointCab 4 Revit) verarbeitet. Ist das BIM-Modell aktualisiert, wird die aktualisierte Version im Austauschformat IFC exportiert und in der Datenbank gesichert.

Von der Änderungserkennung über die Aktualisierung der Punktwolke eines Fabrikgebäudes bis hin zur Aktualisierung des BIM-Modells wird die gesamte Prozesskette zur Aktualisierung des digitalen Gebäudemodells dargestellt und beschrieben. Eine Abbildung des Gesamtprozesses der Aktualisierung findet sich in Abb. 26. Der entwickelte Aktualisierungsprozess soll es ermöglichen, die Datenqualitätsdimension Aktualität (vgl. Kapitel 2.2) während des Fabrikbetriebs zu gewährleisten. Dabei wird entgegen den in der Vergangenheit vorgeschlagenen Push-, Pull- oder

zyklischen Aktualisierungsstrategien [Schindler 2019, S. 71] mittels Laserscannern eine Aktualisierung basierend auf den tatsächlich identifizierten baulichen Veränderungen (Abb. 22) durchgeführt. Der erstmalige Einsatz der Photogrammetrie in der Disziplin Fabrikplanung, insbesondere unter Verwendung von Smartphones, zur Aktualisierung der digitalen Fabrikgebäudemodelle bildet an dieser Stelle den Neuigkeitswert.

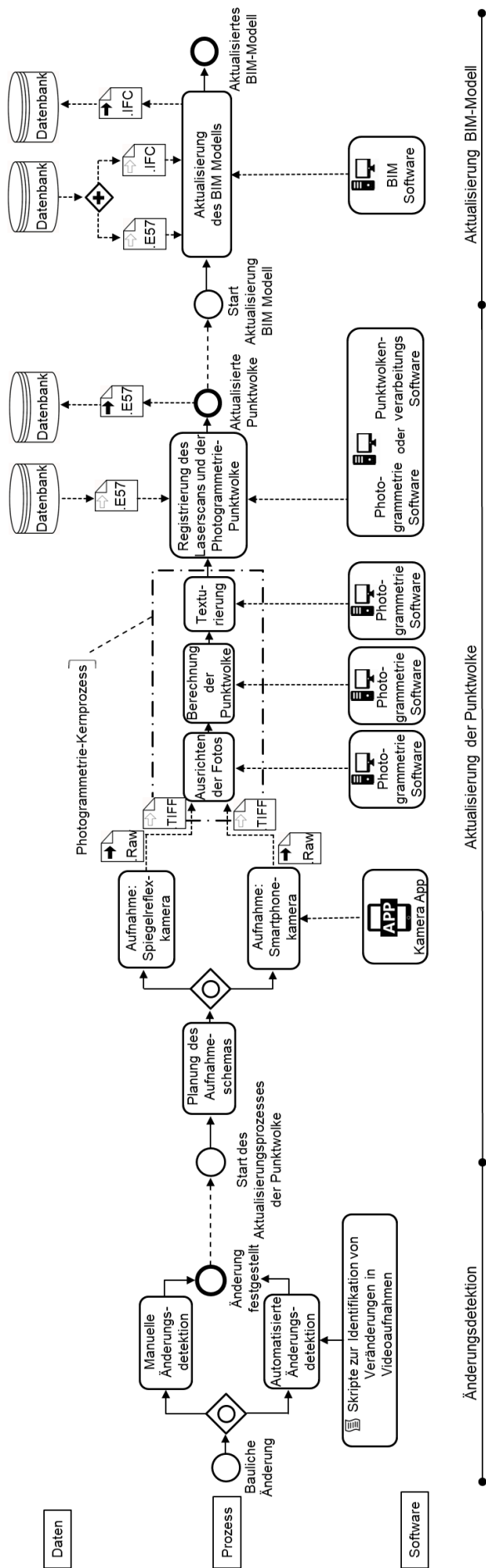


Abb. 26: Gesamtdarstellung des Aktualisierungsprozesses (Methode 1)



In Kapitel 6 (Verifikation und Validierung der Methodik) wird der Zeitaufwand der Erfassung vor Ort und der Prozess der Nachbearbeitung (Photogrammetrie-Kernprozess) mit den Zeitaufwänden der in der Praxis üblichen Aktualisierung unter Verwendung eines Laserscanners verglichen [Hellmuth et al. 2020b, S. 284]. Außerdem wird während der Validierung die Genauigkeit der partiellen Photogrammetriepunktwolken mit den erzeugten Punktwolken des Laserscanners unter Beachtung der [DIN 18202 2019, S. 11], welche die zulässigen Toleranzen von Gebäudemmaßen vorgibt, analysiert.

## **5.2 Methode 2: Change Impact Analyse**

Inhalt des folgenden Kapitels 5.2 ist die Entwicklung der Change Impact Analyse, die während der „Informationsauswertung“ (Abb. 21) den Prozess der Fabrikumbauplanung unterstützt. Die Entwicklung berücksichtigt die Anforderungen einer schnellen und aufwandsarmen Identifikation von Änderungsauswirkungen, die auch Elemente des Fabrikgebäudes beinhaltet (Kapitel 3.5). Nach der getroffenen Entscheidung für einen Fabrikumbau werden die Wirkbeziehungen zwischen der Produktion und dem Fabrikgebäude analysiert. Der resultierende Umbaubedarf des Fabrikgebäudes lässt sich nicht pauschal identifizieren, sondern muss für jedes betroffene Fabrikobjekt (Abb. 9) isoliert beurteilt werden. Erforderlich ist dafür Fachwissen über die existierenden wechselseitigen Einflüsse (Wirkbeziehungen bzw. Interdependenzen) zwischen den in der Fabrikplanung vorhandenen Planungsmodulen sowie den beeinflussten Fabrikobjekten.

In der modernen Fabrikplanung werden immer häufiger Planungsphasen bzw. Planungsschritte als Planungsmodule aufgefasst [Meckelnborg 2015, S. 100 f.], [Graefenstein 2019, S. 124], [Hawer 2020, S. 72–77]. Als Grundlage für die Analyse der Wirkbeziehungen bei Umbauplanungen werden in diesem Kapitel die Fabrikobjekte (Abb. 9) mit den Planungsmodulen verknüpft.

Der Einsatz von Planungsmodulen bietet die Möglichkeit, Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Aufgaben der Fabrikplanung nachvollziehen zu können. Die Abhängigkeiten der jeweiligen Module werden über In- und Outputs dargestellt (Abb. 27). In Abb. 27 wird ein beispielhaftes Planungsmodul mit Input von externen Planungsinformationen und vorgelagerten Planungsmodulen (Inputmodulen) dargestellt. Das Planungsmodul verarbeitet die Eingangsinformationen von vorgelagerten Inputmodulen mithilfe von Methoden (z.B. ABC-Analyse, Morphologischer Kasten etc.) in Ausgangsinformationen, die an das nachgeschaltete Planungsmodul (Outputmodul) weitergeleitet werden (Abb. 27). Dort wird die Planungsinformation wieder als Eingangsinformation verwendet (Abb. 28). Die Modellierungstechnik beruht auf dem Six-Sigma-Ansatz und entnimmt die Elemente der Inputs, Outputs und des eigentlichen Prozesses (hier Planungsmodul) der SI-POC (Supplier - Input - Process - Output - Customer) Modellierungssystematik [Liebethuth 2020, S. 34].

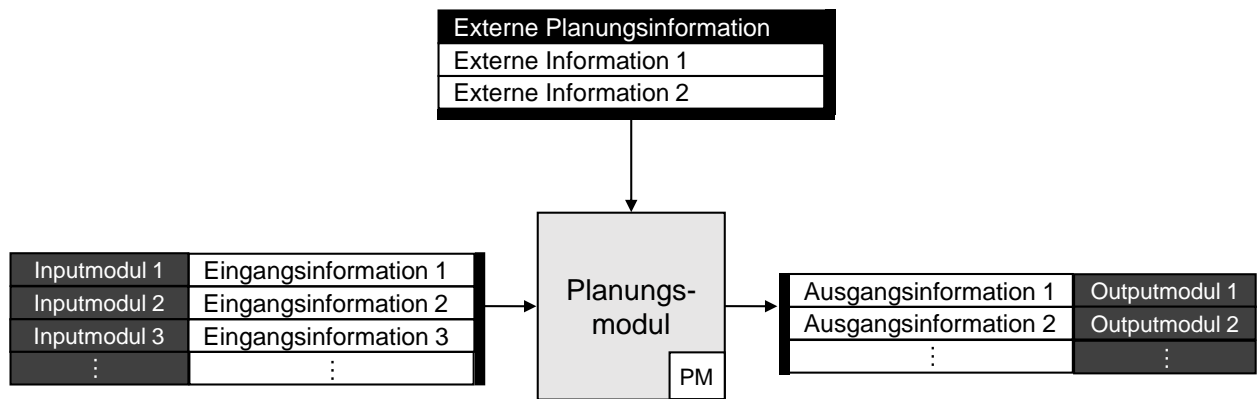


Abb. 27: Beispielhaftes Planungsmodul der Fabrikplanung in Anlehnung an [Nöcker 2012, S. 134]

Zur Integration der Produktionssystem- und der Industriebauplanung für eine Unterstützung der Fabrikumbauplanung wird, angelehnt an die Planungsmodule von [Meckelnborg 2015, S. 225–256] und dessen Vernetzungsmodell [Meckelnborg 2015, S. 101], ein Modell der Interdependenzen (Abb. 28) abgeleitet. Das Modell der Interdependenzen erweitert die Planungsmodule von Meckelnborg um die Beziehung zu den jeweiligen Fabrikobjekten (Abb. 9). Dazu werden die Fabrikobjekte der Produktion mit den Planungsmodulen der Produktionssystemplanung vernetzt (Abb. 28). Die Planungsmodule der Produktion sind wiederum durch die Transfer-Planungsmodule mit den Planungsmodulen der Industriebauplanung (Abb. 28) verbunden. Es existieren jedoch auch direkte Verbindungen von Planungsmodulen der Produktion zu Planungsmodulen der Industriebauplanung. Die Planungsmodule der Industriebauplanung sind folglich an die Fabrikobjekte des Industriebaus angeschlossen (Abb. 28). Somit entsteht über die Planungsmodule eine Verbindung von den Fabrikobjekten der Produktion zu den Fabrikobjekten des Industriebaus (Abb. 28). Bei Änderungen von Planungsinformationen durch einen geplanten Umbau, die als Eingangsinformation Einfluss auf die Planungsmodule haben, können somit die Auswirkungen auf die Fabrikobjekte identifiziert werden. Ändern sich bspw. Planungsinformationen innerhalb der Planungsmodule der Produktion kann die Auswirkung nicht nur auf die Fabrikobjekte der Produktion erfasst, sondern auch Auswirkungen auf Fabrikobjekte des Industriebaus identifiziert werden.

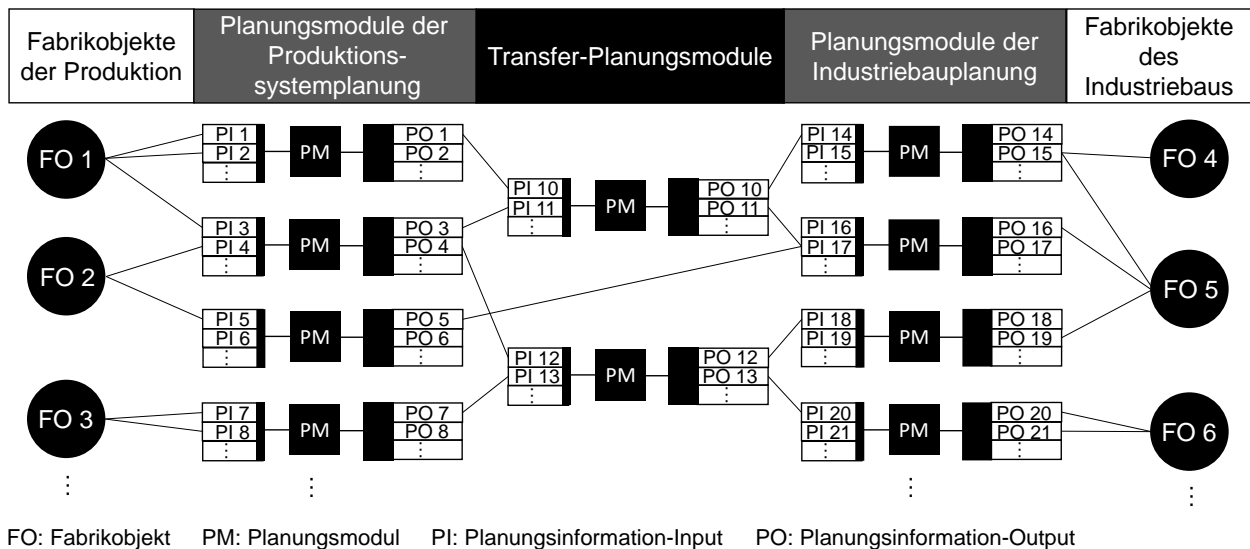


Abb. 28: Modell der Interdependenzen

Für die interdisziplinäre Fabrikumbauplanung sind die disziplinübergreifenden Schnittstellen (Transfer-Planungsmodule) und direkte Verbindungen von entscheidender Bedeutung, da diese entsprechend Abb. 28 Informationen von den Planungsmodulen der Produktionssystemplanung an die Planungsmodule des Industriebaus übergeben. Eine Auflistung aller Planungsmodule der Produktionssystemplanung (Anhang D, Abb. D.1), der Transfer-Planungsmodule (Abb. D.2) sowie der Industriebauplanung (Abb. D.3) für die integrative Fabrikumbauplanung findet sich im Anhang D. Die Planungsmodule sind größtenteils von [Meckelnborg 2015, S. 225–256] übernommen und stammen aus der „Zustandsbasierten Fabrikplanung“ von [Nöcker 2012, S. 144–170]. Da sich beide genannte Ansätze Fabrikneuplanungen widmen, werden einige Planungsmodule, die für Fabrikumbauten irrelevant sind, wie die Standortauswahl, in der vorliegenden Arbeit bei der Entwicklung der Change Impact Analyse nicht berücksichtigt. Des Weiteren werden für die Fabrikumbauplanung notwendige Planungsmodule, wie die Vergabe von Bauleistungen (VBL) hinzugefügt (Anhang D). Somit werden in der vorliegenden Arbeit die Ursprungsmodelle (Modullandkarte der zustandsbasierten Fabrikplanung nach [Nöcker 2012] und das Vernetzungsmodell der integrativen Fabrikplanung nach [Meckelnborg 2015, S. 101]) für die Fabrikumbauplanung angepasst und weiterentwickelt. Die Weiterentwicklung erfolgt, indem die Planungsmodule an die Fabrikobjekte im Modell der Interdependenzen gekoppelt werden (Abb. 28). Außerdem werden in das Modell ausschließlich diejenigen Planungsmodule einbezogen, die für die Umplanung einer Fabrik notwendig sind. Bei den Transfer-Planungsmodulen wird das für die Umbauplanung nicht notwendige Planungsmodul „Standortauswahl“ durch ein für die Fabrikumbauplanung relevantes Planungsmodul „Vergabe von Bauleistungen“ ersetzt. Die von den Planungsmodulen durch die In- und Outputs ausgehenden Wirkbeziehungen sind idealtypisch, jedoch auf die Praxis übertragbar [Hawer 2020, S. 75 f.]. Bei der Anwendung sind diese jedoch für den Einzelfall zu prüfen und bei Bedarf anzupassen.

Zwischen den einzelnen Planungsmodulen werden Planungsinformationen (Abb. 29) ausgetauscht [Meckelnborg 2015, S. 116–145]. Als Input werden für das beispielhafte Planungsmodul Starkstromanlagenplanung (SAP) der Industriebauplanung unter anderem die Maschinen- und Anlageneigenschaften [Meckelnborg 2015, S. 125] verwendet (Abb. 29). Als Output des Planungsmoduls SAP entstehen Informationen für die Gebäudepläne (Grundrissplan) [Meckelnborg 2015, S. 139], die bspw. an die Innenausbauplanung (IAP) weitergegeben werden. Eine detaillierte Beschreibung der Planungsinformationen findet sich bei [Meckelnborg 2015, S. 116–145]. Ist eine Ausgangsinformation eines Planungsmoduls zugleich Eingangsinformation eines anderen Planungsmoduls, besteht zwischen diesen Planungsmodulen eine Wechselwirkung in Form eines Informationsaustausches.

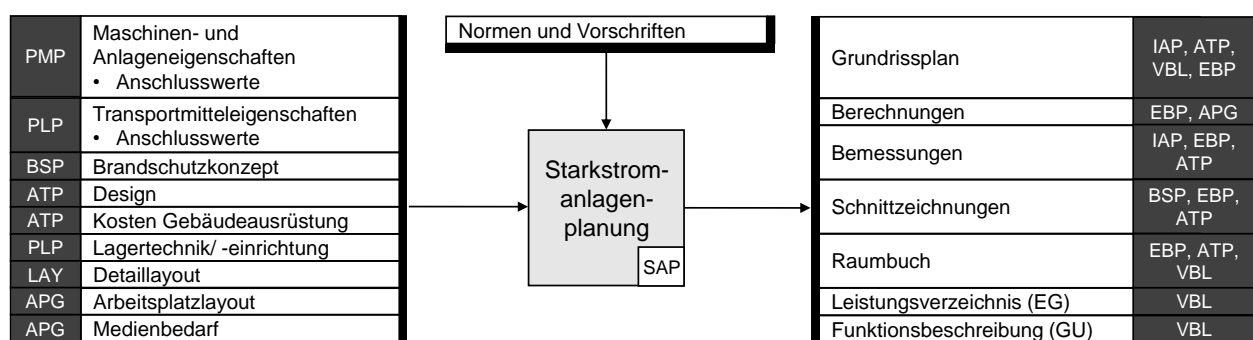


Abb. 29: Beispielhaftes Planungsmodul Starkstromanlagenplanung (SAP) mit ein- und ausgehenden Planungsinformationen nach [Meckelnborg 2015, S. 248]

Dadurch entsteht ein Netzwerk von Verbindungen zwischen Fabrikobjekten und Planungsmodulen, die durch Planungsinformationen miteinander verbunden sind (Abb. 28, Abb D.4). Durch die Vielzahl von Verbindungen zwischen den Planungsmodulen und Fabrikobjekten ist es sehr aufwändig, die Auswirkungen bei einer durch einen geplanten Umbau veränderte Planungsinformation, wie Maschinen- und Anlageneigenschaften, manuell zu identifizieren. Die Operationalisierung der Identifikation von Auswirkungen von Umbaumaßnahmen innerhalb des erarbeiteten Wirkungsnetzwerkes (Abb. 28, Abb. D.4) erfolgt daher durch die Anwendung eines Softwarewerkzeugs. Dazu wird die Vorgehensweise der Netzplantechnik zur Analyse von Beziehungen zwischen den einzelnen Vorgängen angewandt. Zur Entwicklung eines Softwarewerkzeugs, das zur automatisierten Änderungsdetektion (Change Impact Analyse) eingesetzt werden kann, kommt die Graphenbibliothek NetworkX von Python zur Anwendung. Um die Wirkbeziehungen abzubilden, wird der Netzplan bzw. der Graph und dessen Knoten (Planungsmodule) zunächst als Code angelegt. Dazu werden alle Verbindungen zwischen den Planungsmodulen und Fabrikobjekten im Code abgebildet. Anschließend werden die Planungsinformationen (Eingangs- und Ausgangsinformationen) im Code mit den Planungsmodulen verknüpft. Zuletzt wird im Code definiert, welche Fabrikobjekte mit den Planungsmodulen verbunden sind, um die Auswirkungen auf die Fabrikobjekte ausgeben zu können.

Das Softwarewerkzeug kann dementsprechend durch Abfragen, bei denen die im Zuge der Umplanung sich ändernden Planungsinformation eingegeben werden, die Auswirkungen in einem Graph anzeigen. Dazu greift das Softwarewerkzeug auf die Programmbibliothek des Python-Moduls „Matplotlib“ zu, die es erlaubt mathematische Darstellungen darzustellen. Matplotlib verfügt wiederum über eine Matlab-Emulationsumgebung namens PyLab, die eine Programmierschnittstelle der Matplotlib darstellt. Matplotlib ist das übergeordnete Softwarepaket, matplotlib.pyplot ist ein Modul in Matplotlib und PyLab die Schnittstelle, die den Zugriff auf die auszugebenden Darstellungen ermöglicht. PyLab wird neben Matplotlib für das Softwarewerkzeug installiert. Das Softwarewerkzeug soll es ermöglichen, in kurzer Zeit die Auswirkungen von Umbaumaßnahmen auf die Fabrikobjekte zu identifizieren.

Im ausgegebenen Graphen werden jedoch nur die Fabrikobjekte und Planungsmodule aufgeführt, die durch eine direkte Verbindung zwischen den Planungsmodulen von der Änderung einer Planungsinformation betroffen sind. D.h. der Graph gibt die minimalen Auswirkungen der Änderung einer Planungsinformation an. In der Praxis ist daher zu prüfen, ob weitere Fabrikobjekte bei Änderungen betroffen sind, da es möglich ist, dass jeder Ausgangsparameter von jedem Eingangsparameter eines Planungsmoduls beeinflusst werden kann.

Ein Vorgehen zur detaillierten Analyse der Wirkbeziehungen zwischen Ein- und Ausgangsparametern innerhalb der Planungsmodule liefern [Krunke 2017, S. 127–131] und [Hawer 2020, S. 79]. Die entwickelte Methode 2 soll jedoch eine schnelle Möglichkeit bieten, die wesentlichen Auswirkungen eines Umbaus innerhalb einer Fabrik auf die Fabrikobjekte zu identifizieren. Daher wird an dieser Stelle auf eine detailliertere Betrachtung der Wirkbeziehungen innerhalb der Planungsmodule verzichtet. Außerdem wird in der entwickelten Change Impact Analyse die generelle Abhängigkeit bzw. Wirkbeziehung zwischen Fabrikobjekten und Planungsmodulen identifiziert. Die Berücksichtigung der Art und Stärke der Wirkbeziehungen, wie sie [Hawer 2020, S. 87] analysiert, erfolgt nicht, da dies den Zeitaufwand bei der Durchführung deutlich erhöht und damit die einfache Handhabbarkeit einschränkt.

Insgesamt sollen durch die vorgestellte Vorgehensweise Auswirkungen von geplanten Umbaumaßnahmen auf die Fabrik, über Fabrikobjekte und deren Wechselwirkungen (Abb. 28 und Abb. D.4) über Planungsmodule (Abb. 29) identifiziert werden. Die Identifikation der von einem Umbau betroffenen Fabrikobjekte ermöglicht eine Aussage über die Bestandteile einer Fabrik, welche in die Umplanung miteinbezogen werden müssen. Dadurch soll ein Beitrag zur schnellen Reaktion auf Veränderungen geleistet werden. Das Ergebnis der Methode 2 besteht aus dem Modell der Interdependenzen (Abb. 28, Abb. D.4) und dem Softwarewerkzeug zur automatisierten Änderungsdetektion (Change Impact Analyse). Die Anwendung des Softwarewerkzeugs erfolgt im Kapitel 6 (Verifikation und Validierung der Methodik).

Um die Umbauplanung der Fabrik auszulösen, ist eine Rückmeldung aus den Fachplanungen im Rahmen der bevorstehenden Fabrikumbauplanung (Strukturplanung) notwendig, um deren Umsetzbarkeit sicherzustellen. Mithilfe der nachfolgenden Methode werden in Hinblick auf den Einsatz eines digitalen Fabrikgebäudemodells die Informationsanforderungen untersucht, die von den am Fabrikumbau beteiligten Fachplanern (Abb. 11) an das Fabrikgebäudemodell gestellt werden.

### **5.3 Methode 3: Informationsanforderungserhebung für digitale Fabrikgebäudemodelle**

Die zeitgerechte Umsetzung identifizierter und notwendiger Umbaumaßnahmen, vorrangig unter dem Einfluss einer turbulenten Unternehmensumwelt verlangt eine umfassende Kommunikation zwischen den an der Umbauplanung beteiligten Fachplanern (Abb. 11), um Planungsinformationen auszutauschen [Fiebig 2004, S. 1 ff.], [Wulf 2011, S. 2], [Kerkenberg 2016, S. 105]. Um eine disziplinübergreifende Zusammenarbeit zu ermöglichen, wird in dieser Methode ein Vorgehen entwickelt, das die variierenden Anforderungen und Informationsbedarfe an das digitale Fabrikgebäudemodell bei einem Umbau systematisch erfasst. Informationsanforderungen spezifizieren hierbei die Informationen, die im digitalen Fabrikgebäudemodell erforderlich sind, um eine Fabrikumbauplanung durchzuführen. Die Entwicklung der Methode basiert auf den Anforderungen aus Kapitel 3.5 und wird so konzipiert, dass sie auf die Bedürfnisse der beteiligten Planer der Fabrikumbauplanung zugeschnitten ist. Ziel ist es, das dem Systems Engineering zugehörige Requirements Engineering [Hammerschall & Beneken 2013, S. 31], [Farid & Suh 2016, S. 12] zur Erfassung der Informationsanforderungen einzusetzen. Auch die Systematik des Axiomatischen Designs [Farid & Suh 2016, S. 151 ff.] wird angewandt, um die Informationsanforderungen des Hauptsystems Fabrikgebäude solange auf diverse Subsysteme bzw. BIM-Objekte herunterzubrechen, bis die Informationsanforderungen für die einzelnen BIM-Objekte oder BIM-Elemente identifiziert sind.

Um diese Informationsbedarfe zu benennen bzw. abzufragen, werden Abfragemechanismen, die bisher im Requirements Engineering der Softwareentwicklung verwendet werden, angepasst und für die Abfrage von Informationsanforderungen im Kontext digitaler Fabrikgebäudemodelle eingesetzt.

Neben den benötigten Informationen muss im Hinblick auf die digitalen Fabrikgebäudemodelle auch die Informationsbedarfstiefe in Form der LODs (Kapitel 2.2) berücksichtigt werden. Damit die Informationsbereitstellung dem Zweck der Umbauplanung entsprechen kann, ist es erforderlich, den Informationsbedarf (Informationsanforderung) hinsichtlich geometrischer Informationen,

Attributinformationen, Terminplaninformationen, Kosteninformationen und Informationen zu Vertragsinhalten eindeutig zu differenzieren.

Der Informationsbereitstellung durch zentral verwaltete Gebäudemodelle widmen sich zahlreiche nationale und internationale Normen und Richtlinien [DIN EN ISO 19650-1 2019, S. 33], [DIN EN ISO 12006-2 2020, S. 5], [VDI 2552-9 2020, S. 4]. In Anhang E (Abb. E.1) findet sich eine Übersicht der wichtigsten Normen und Richtlinien, die sich dem Informationsmanagement digitaler Gebäudemodelle widmen. Die Vorgaben der Normen und Richtlinien fließen mit in die Entwicklung der Methode zur Informationsanforderungserhebung (Methode 3) ein und berücksichtigen diese. Trotz der zahlreichen Beschreibungen von Informationsaustauschbeziehungen in den genannten Normen in Anhang E und den existierenden Ansätzen (Kapitel 3.2) werden Informationsanforderungen an das digitale Fabrikgebäudemodell zur Identifikation von benötigten Informationen für die Fabrikumbauplanung bisher nicht strukturiert erhoben. Das Requirements Engineering, das bereits erfolgreich auf die Baubranche übertragen wurde, kommt jedoch bisher noch nicht zur Anforderungserhebung bei Umbauprozessen in Fabriken zum Einsatz. Eine Anpassung des Requirements Engineering soll daher strukturiert Aufschluss über folgende Fragestellung liefern: Welcher Planungsbeteiligter (aus der Produktions- und Industriebauplanung) benötigt welche Informationen in welcher Qualität zu den jeweiligen Planungsmeilensteinen? Hierbei muss berücksichtigt werden, dass sich im Bereich der Fabrikplanung bei einem Umbau die relevanten Informationsanforderungen für Planer des Produktionssystems erheblich von den Informationen unterscheiden können, die von den Beteiligten der Gebäudeplanung benötigt werden.

Um das Requirements Engineering für die Fabrikumbauplanung einsetzen zu können, müssen zunächst die erforderlichen Informationsanforderungskategorien definiert werden. Die ursprüngliche Disziplin des Requirements Engineerings, die Softwareentwicklung, unterscheidet eine Vielzahl von Anforderungen [Hammerschall & Beneken 2013, S. 91]. Diese Anforderungen können nicht auf den Umbauprozess in Fabriken übertragen werden. Es ist somit notwendig, die Kategorien der Informationsaustauschanforderungen für digitale Gebäudemodelle zu identifizieren. Dafür werden zunächst die in Anhang E genannten Normen und Richtlinien der jeweiligen nationalen und internationalen Einrichtungen und Institute analysiert. Insbesondere in der DIN EN ISO 19650-1 wird definiert, dass digitale Gebäudeinformationsmodelle dazu dienen, um Informationen unterschiedlichster Art in einer CDE zusammenzufassen [DIN EN ISO 19650-1 2019, S. 34]. Dies macht es notwendig, ein für alle Planungsbeteiligten gemeinsames Verständnis hinsichtlich möglicher Bauprozesse und die zur Ausführung benötigten Informationen und deren Anforderungen zu schaffen. DIN EN ISO 29481-1 liefert dazu mit dem Handbuch der Informationslieferungen (englisch: Information Delivery Manual, IDM) eine Methode, welche die Bauprozesse mit den für diese Prozesse erforderlichen Informationen vereint [DIN EN ISO 29481-1 2018, S. 8]. Das IDM

beschreibt auch eine Form, in der die Informationen spezifiziert werden sollen und eine Vorgehensweise, um die Informationsprozesse während eines Bauprozesses abzubilden und zu beschreiben. Fabrikplaner sind in diesem Konstrukt noch nicht vorgesehen. Bei der Entwicklung der Methode müssen die Fabrikplaner jedoch einbezogen werden. Die hier vorgestellte Methode zur Informationsanforderungserfassung soll mit dem in der DIN EN ISO 29481-1 genannten IDM und der Modell-Bereichs-Definition (englisch: Model View Definition, MVD) kompatibel sein. Die Modell-Bereichs-Definition ist ein Teilschema des gesamten Datenmodells, das benötigt wird, um eine oder mehrere Informationsaustauschanforderungen im Bauprozess des Gebäudes zu erfüllen. Ebenfalls wird in den genannten Normen festgelegt, dass eine Informationsaustauschanforderung die Verbindung zwischen den Daten und einem Prozess herstellt [DIN EN ISO 29481-1 2018, S. 17]. Die Informationsaustauschanforderungen stellen somit den Zusammenhang des Informationsbedarfs eines Planungsbeteiligten und dessen zu erstellender Planungsleistung her. Neben den Normen, die überwiegend die formalen Informationsaustauschanforderungen beschreiben, stammen inhaltliche Informationsanforderungen (Objektanforderungen) direkt von den Umplanungsmitgliedern (Abb. 30). Weitere wichtige Quellen für domänenspezifische Informationsanforderungen sind die eigentlichen Bauverträge (Abb. 30), in denen die vorherrschenden Standards verankert sind.

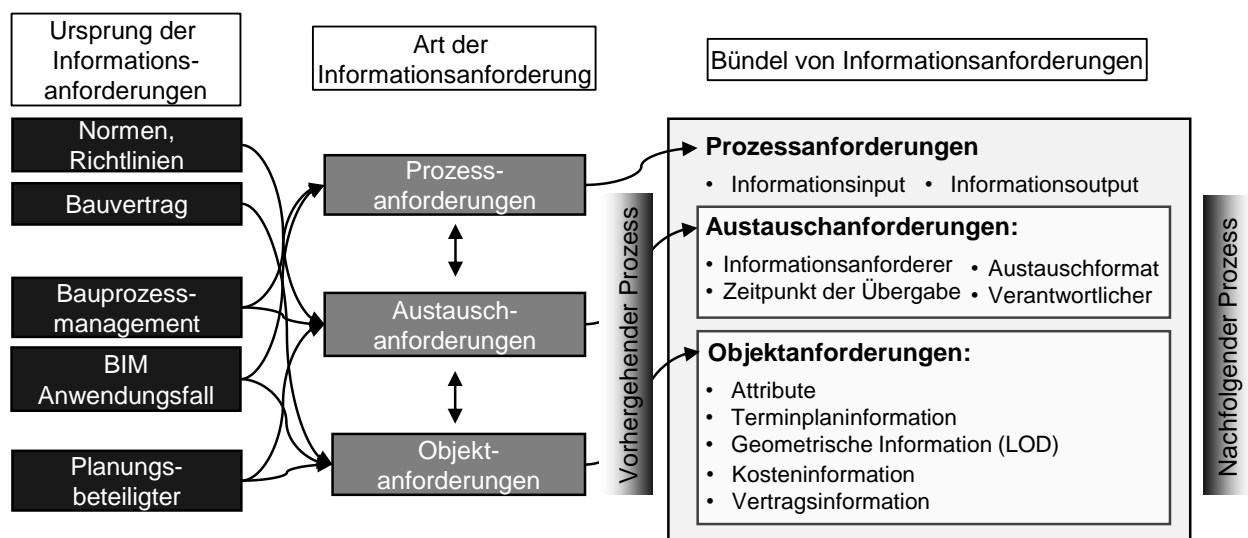


Abb. 30: Abgeleitete Informationsanforderungskategorien für digitale Gebäudemodelle

Darüber hinaus ergeben sich aus den Zusammenhängen zwischen den einzelnen Bauprozessen Prozessanforderungen, die sich auf die BIM-Prozesse (BIM-Anwendungsfälle) beziehen (Abb. 30). Aus den beschriebenen Informationsanforderungsquellen lassen sich insgesamt drei notwendige Kategorien von Informationsanforderungen ableiten, um Informationsanforderungen an ein digitales Gebäudemodell adäquat beschreiben zu können: Prozessanforderungen, Aus-



tauschanforderungen und Objktanforderungen. Daraus ergibt sich ein Bündel von Informationsanforderungen, die von den Planungsbeteiligten angegeben bzw. abgefragt werden müssen (Abb. 30).

Die Prozessanforderungen berücksichtigen die vorhergehenden und nachfolgenden Prozesse und stellen sicher, dass alle Informationen für den nachfolgenden (BIM-)Prozess bereitgestellt werden. Die Austauschforderung stellt die Verbindung zwischen den Objektdaten und dem BIM-Prozess her (Abb. 30). Eine Austauschforderung ist ein Satz von formalen Informationen, die zwischen Planungsbeteiligten für einen während des Umbaus benötigten Prozess ausgetauscht werden. Die Objktanforderungen enthalten die inhaltlichen Informationen, die der Planer für seinen Teilprozess der Fabrikumbauplanung benötigt. Dies sind geometrische Informationen, die durch ein bestimmtes LOD dargestellt werden, Attributinformationen der BIM-Objekte, Informationen über den Terminplan, die Kosten und den Vertrag (Abb. 30). Die identifizierten Informationsanforderungskategorien und deren Inhalte werden bei der Informationsanforderungserhebung im Folgenden berücksichtigt.

Das erste Element der Methode zur Informationsanforderungserhebung der Umbaubeteiligten ist eine Anforderungsschablone, welche für die Abfrage von Informationsanforderungen an digitale Gebäudemodelle angepasst ist (Abb. 31).

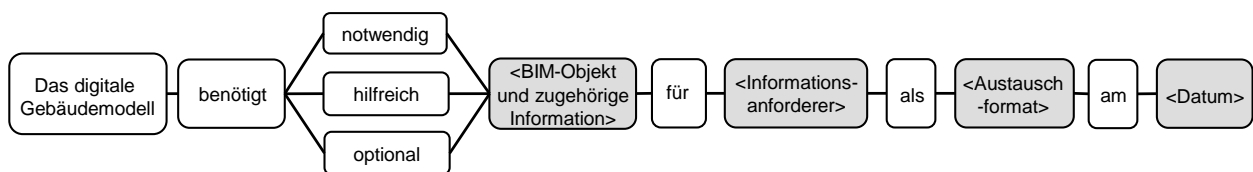


Abb. 31: Informationsanforderungsschablone in Anlehnung an [Rupp 2014, S. 220]

Die Informationsanforderungsschablone stellt sicher, dass die Planer bei der Formulierung ihrer Informationsanforderungen unterstützt werden und keine elementaren Informationen vergessen (Abb. 31). Abgefragt werden vom BIM-Koordinator mithilfe der Anforderungsschablone die benötigten Modellobjekte und deren Informationsattribute, die Dringlichkeit des Informationsbedarfs, das gewünschte Dateiformat sowie das geforderte Datum der Informationsbereitstellung (Abb. 31). Die von allen am Umbauprozess beteiligten Planer abgefragten Informationen werden vom BIM-Gesamtkoordinator in die Informationsanforderungsliste (Tab. 2) übernommen.

Die Informationsanforderungsliste bietet einen Überblick über alle bei einer Umplanung eingehenden Informationsanforderungen. Mithilfe von Filtertechniken lassen sich die Informationsanforderungen eines bestimmten Planers oder mit einer bestimmten Dringlichkeit (notwendig, hilfreich oder optional) extrahieren (Tab. 2).

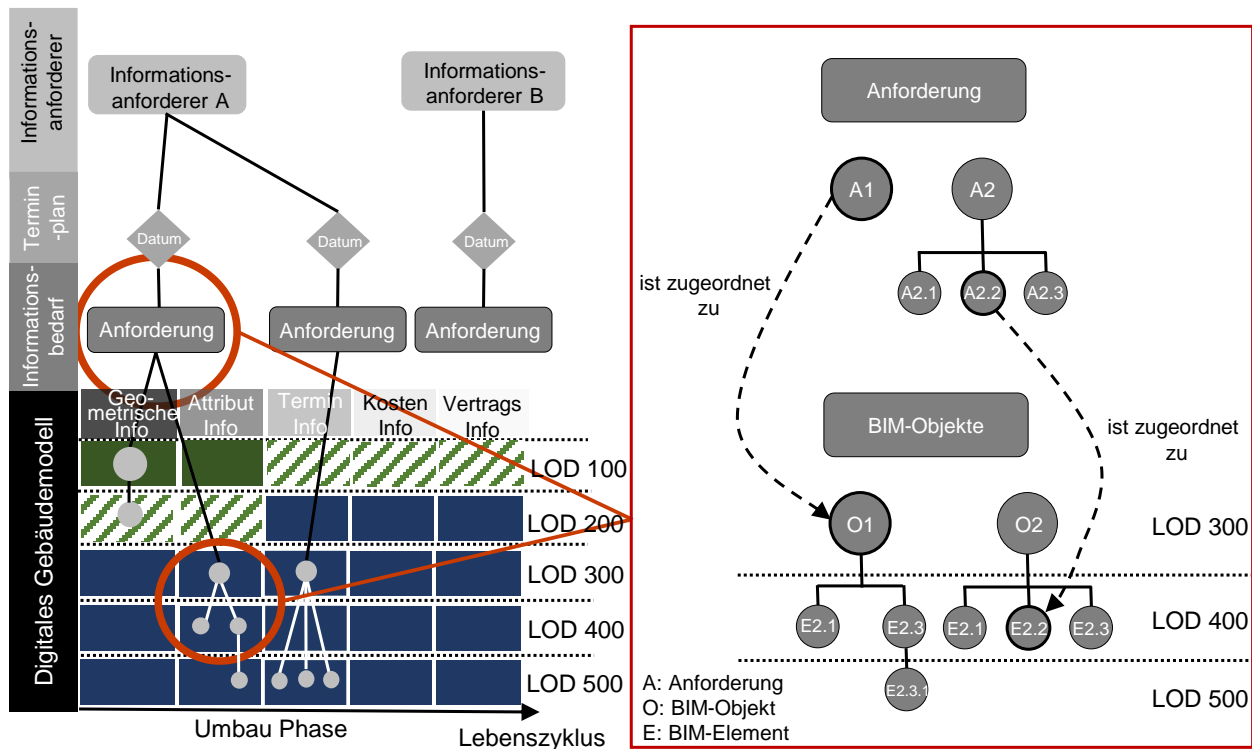
Tab. 2: Informationsanforderungsliste

Anforderungsliste										
KG	BIM-Objekt				Zugehörige Informationen (zum BIM-Objekt)	Dringlichkeit	Informationsanforderer	Austauschformat		Zeitpunkt des Datenaustauschs
	Modell-Element	Stockwerk	Raum/ Stützenraster	Standort/ Koordinaten				Daten-Format	Anwendung und Version	
300	Bauwerk - Baukonstruktionen									
	Außenwände									
	Tragende Außenwände									
	Nichttragende Außenwände									
	Außenstützen									
	Außenwandöffnungen									
	Außenwandbekleidungen, außen									
	Außenwandbekleidungen, innen									
	Innenwände									
	Tragende Innenwände									
	Nichttragende Innenwände									

KG: Kostengruppe

Der BIM-Gesamtkoordinator (Kapitel 2.2) erhält so eine nach den Kostengruppen der DIN 276 strukturierte Auflistung aller Informationsanforderungen, die Planungsbeteiligte zur Durchführung der Fabrikumbauplanung an das digitale Fabrikgebäudemodell stellen.

Nach der Identifikation der Informationsanforderungen folgt die Zuordnung der Informationsanforderungen zu den jeweiligen Modellobjekten und Informationen. Dazu werden die abgefragten Informationsanforderungen vom BIM-Manager in die LOD-Zuordnungsmatrix (Abb. 32) eingepflegt. Die LOD-Zuordnungsmatrix wird durch die im digitalen Gebäudemodell beinhalteten Informationen (Geometrien, Attribute, Termine, Kosten und Verträge) und den einzelnen BIM-Objekten bzw. Bauleistungen sowie den LODs aufgespannt (Abb. 32). Der BIM-Manager kann anschließend alle Informationsanforderungen aus der Informationsanforderungsliste des BIM-Gesamtkoordinators, welche die Informationsanforderungen der Planungsbeteiligten beinhaltet, den Informationskategorien (Geometrie, Attribut usw.) zuordnen (Abb. 32). Damit ist eine Übersicht und Zuordnung aller benötigten BIM-Objekte für den jeweiligen Umbau zu einem LOD gegeben. Das Ergebnis ist die notwendige Gesamt-LOD des digitalen Gebäudemodells, das für den Fabrikumbau benötigt wird. Abhängig vom Ergebnis kann auch entschieden werden, ob das Gebäudemodell unterschiedliche LODs für verschiedene Gewerke aufweisen kann. Auf diese Weise kann die Erzeugung von hohen LODs vermieden werden, was einen enormen Mehraufwand bedeuten würde [Leite et al. 2011, S. 605].



- Punktwolken mit verbundenem Datenmanagementsystem
- Punktwolken mit verbundenem Datenmanagementsystem ODER BIM-Modell in Verbindung mit Software für Kosten- und Terminplanung, Ausschreibung, Vergabe, Abrechnung, Baumanagement
- BIM-Modell in Verbindung mit Software für Kosten- und Terminplanung, Ausschreibung, Vergabe, Abrechnung, Baumanagement

Abb. 32: LOD-Zuordnungsmatrix

In Fällen mit niedrigem LOD (LOD 100 und LOD 200, Abb. 32) können nach Literaturangaben auch Punktwolken zur Abdeckung der Geometrieinformationen verwendet werden: Bspw. für den Zugriff auf geometrische Informationen von Montagelinien [Shellshear et al. 2015, S. 63] und der Analyse von TGA-Komponenten [Kalasapudi et al. 2014, S. 150]. Die einzelnen Informationsanforderungen können bei komplexen Sachverhalten analog dem axiomatischen Design in untergeordnete Teilanforderungen aufgeteilt werden (Abb. 32, rechts). Demzufolge können die von den beteiligten Planern geforderten Informationsbedarfe als Anforderungen an das digitale Fabrikgebäudemodell gestellt und durch die Informationen in den BIM-Objekten oder den untergeordneten BIM-Elementen im geeigneten LOD entnommen werden. Die Informationsanforderungen erlauben es, eine Entscheidung über die benötigte Form des digitalen Gebäudemodells (Punktwolke oder BIM-Modell) zu treffen.

Wenn alle Informationsanforderungen der Planungsbeteiligten durch das vorhandene digitale Fabrikgebäudemodell und den darin enthaltenen Informationen gedeckt werden können, ist es für den jeweiligen Umplanungsprozess geeignet. Fehlen Informationen im digitalen Fabrikgebäudemodell, wird dies durch die LOD-Zuordnungsmatrix identifiziert. Dies kann bspw. der Fall sein, wenn neben den geometrischen Informationen auch detaillierte Attributinformationen für den Umplanungsfall benötigt werden. Bei fehlenden Informationen müssen die benötigten Modellinhalte von den verantwortlichen Fachplanern angefordert werden. Dies geschieht über die Spezifikation für die Lieferung von digitalen Modellinhalten (Abb. 33, Tab. E.2), indem ein Verantwortlicher für die Modellerstellung in einem geforderten LOD beauftragt wird. Eine Gesamtdarstellung der Methode, die als „Informationsanforderungserhebung für digitale Fabrikgebäudemodelle“ bezeichnet wird, stellt Abb. 33 dar.

Die Entwicklung der vorgestellten Methode ermöglicht die Erfassung von Informationsanforderungen an ein digitales Fabrikgebäudemodell und vermeidet durch die strukturierte Vorgehensweise Ineffizienzen. Alle Informationsanforderungen können anhand der LOD-Zuordnungsmatrix (Abb. 32) auf die erforderlichen BIM-Objekte projiziert und nachverfolgt werden. Es entsteht für einen Fabrikumbau eine transparente Darstellung der notwendigen Modellinhalte. Weiterführende Erläuterungen zu den erwähnten IDM und MVD, die den Kontext und Rahmen der hier vorgestellten Methode zur Informationsanforderungserhebung aufspannen, finden sich in einer eigenen Veröffentlichung [Hellmuth 2020]. Die Verifikation der Methode findet in Kapitel 6.3 statt.

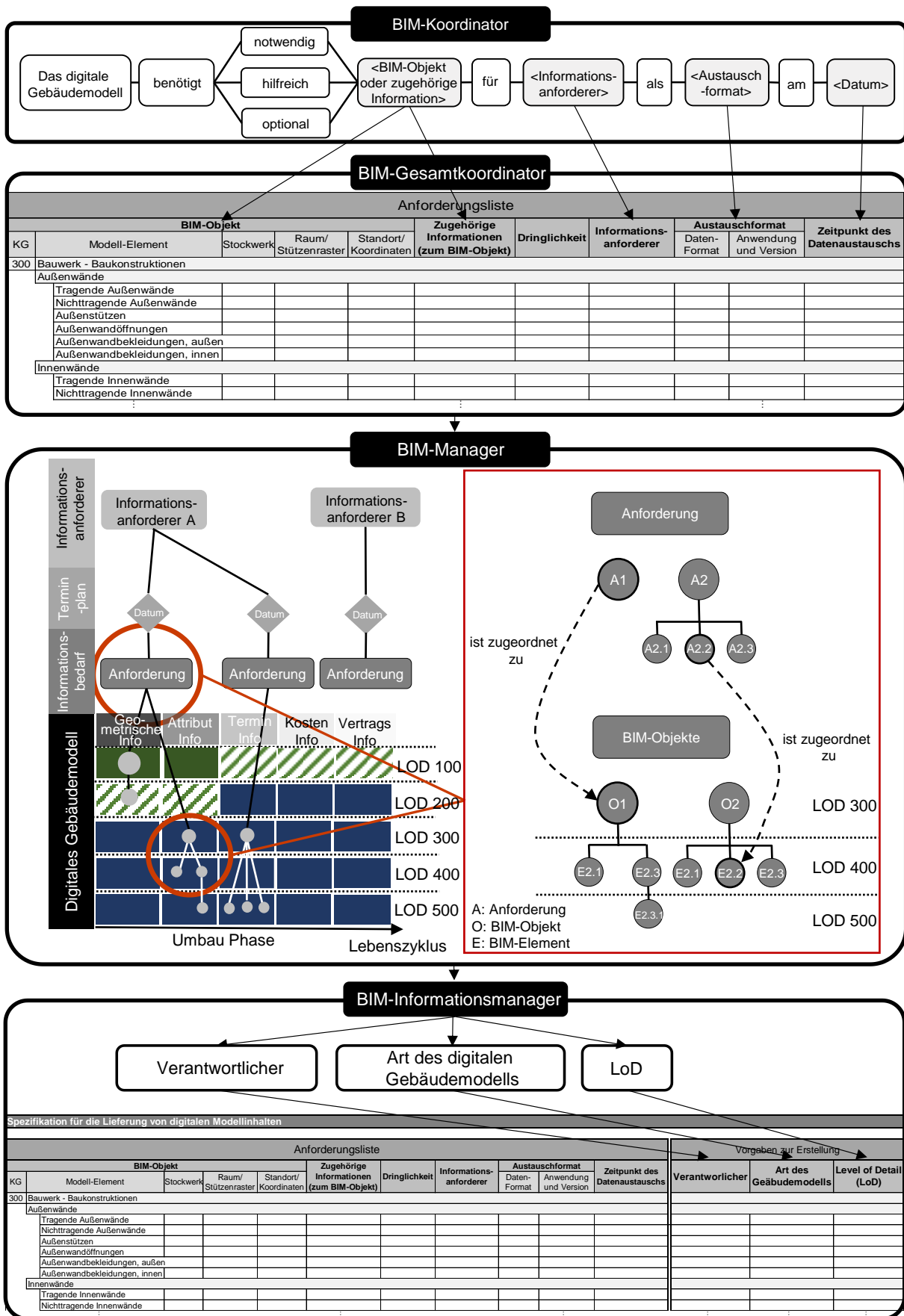


Abb. 33: Gesamtdarstellung der Informationsanforderungserhebung für digitale Fabrikgebäude-modelle

## 5.4 Methode 4: Augmented Reality – Informationsbereitstellung

Liegen aktuelle digitale Fabrikgebäudemodelle aufgrund des Aktualisierungsprozesses (Kapitel 5.1) vor, können diese während des Umbauprozesses in der Vorbereitungsphase (Abb. 7) zur Informationsbereitstellung und Entscheidungsunterstützung verwendet werden.

Um auf die aktuellen BIM-Modelle vor Ort auf der Baustelle zugreifen zu können, wird ein AR-Softwarewerkzeug konzipiert, das basierend auf den Anforderungen aus Kapitel 3.5 visuell die für die Fabrikumbauplanung benötigten Inhalte eines BIM-Modells hinsichtlich Geometrie, Attribute, Termine, Kosten und Vertrag darstellt. Außerdem soll das Softwarewerkzeug für den jeweiligen Umbauprozess eine Visualisierung der notwendigen LODs ermöglichen (vgl. Kapitel 5.3).

Für die Konzeption des AR-Softwarewerkzeug werden die in der DIN EN ISO 9241-110 festgelegten Prinzipien zur Interaktion und Ergonomie der Mensch-System-Interaktion berücksichtigt. Dazu gehört bspw. die Angemessenheit des Softwarewerkzeugs für die Benutzeraufgaben, ein selbsterklärendes Userinterface (UI), die Erwartungskonformität in Hinblick auf das Systemverhalten während der Bedienung oder die Steuer- und Bedienbarkeit während des jeweiligen Verwendungszwecks [DIN EN ISO 9241-110 2020, S. 12]. Die Konzeption des AR-Softwarewerkzeugs erfolgt für den Nutzungskontext von Umbauprozessen, um die beteiligten Planer zu befähigen, ihre benötigten Informationen effektiv und effizient während Baubesprechungen abzurufen. Dazu wird das Softwarewerkzeug auf die Ziele und Aufgaben (z.B.: Gebäudevisualisierung, Bauablaufplan), die während eines Fabrikumbaus anfallen, zugeschnitten und die vorhandenen aktuellen Datenquellen (Fabrikgebäudemodelle) visualisiert [DIN EN ISO 9241-11 2018, S. 15]. Die Entwicklung des UIs beruht auf den Grundsätzen der Informationsdarstellung nach den DIN Normen DIN EN ISO 9241-112 und der DIN EN ISO 9241-125 zur Darstellung visueller Informationen. Diese Grundsätze stellen die einfache Interaktion mit der Anwendung und die inhaltliche sowie darstellungsbezogene Konsistenz der Softwareanwendung sicher [DIN EN ISO 9241-112 2017, S. 27], damit Inhalte eindeutig interpretierbar sind [DIN EN ISO 9241-125 2018, S. 16].

Um ein für den Umplanungsfall in Fabrikgebäuden geeignetes UI zu konzipieren, wird eine Abfrage von UI-Experten und Planern durch ein Paper-Mock-Up durchgeführt. Das Prototyping von Apps auf Papier (Paper-Mock-Up) ist eine schnelle sowie einfache Abfragemethode, um mit der Konzeption eines neuen Softwarewerkzeugs zu beginnen. Durch die Verwendung eines Paper-Mock-Ups kann die Funktionalität demonstriert werden, um in sehr frühen Phasen der Ideenfindung die Zustimmung von Nutzern einzuholen, bevor mit der detaillierten Umsetzung des Prototyps begonnen wird. Die Umfrage als Paper-UI Mock-Up, das neun mögliche Userinterfaces den UI-Experten und Anwendern vorschlägt, befindet sich in Anhang F (Tab. F.2). Das Ergebnis der

UI-Bewertung von 15 befragten UI-Experten und Planern befindet sich ebenfalls in Anhang F (Tab. F.3).



Abb. 34: Bestbewertetes UI-Konzept

Das am besten bewertete UI (Anhang F, Tab. F.3) wird mit schwarzer Schrift in Abb. 34 dargestellt und ist in der rechten unteren Ecke platziert. Somit ist das UI beim Halten und Bedienen des Tablets gut erreichbar (Abb. 35). Die Ergebnisse der Umfrage unterstützen die Konzeption des UI und bilden die Grundlage für die nachfolgende Entwicklung des AR-Softwarewerkzeugs.

Um die Anforderung zu erfüllen, digitale Fabrikgebäudemodelle mobil bereitzustellen, werden die dafür notwendigen Systemkomponenten für ein Softwarewerkzeug ausgewählt und in Tab. 3 aufgelistet.

Tab. 3: Ausgewählte Systemkomponenten für das AR-Softwarewerkzeug

<b>Systembausteine</b>	<b>Ausgewählte technische Komponente</b>
Entwicklungsumgebung	Unity
Trackingsystem	Markerbasiertes Trackingsystem (Vuforia)
Visualisierungs- und Eingabegerät	iPad Pro (12,9 Zoll, 3. Generation)

Die dem Auswahlprozess der Systemkomponenten (Entwicklungsumgebung, Trackingsystem, Visualisierungs- und Eingabegerät) zugrundeliegenden Auswahlkriterien und Ergebnisse werden in Anhang F (Abb. F.1, Abb. F.2 und Abb. F.3) benannt. Zur Nutzung von digitalen Fabrikgebäudemodellen (BIM-Modellen) in einer AR-Softwareanwendung wird die 3D-Entwicklungsplattform Unity verwendet. Unter Verwendung der Ressourcen in Unity kann die eigene AR-Engine von Unity (AR Foundation) oder externe AR-Engines eingebunden werden. Als AR-Framework (AR-Engine und Trackingsystem) wird das markerbasierte Trackingsystem von Vuforia ausgewählt (Anhang F, Abb. F.2). Die Grundrisse des Fabrikgebäudes können mit Hilfe von Vuforia als bildbasierter Marker hinterlegt werden, um anschließend den Grundriss über das Kamerabild mit bekannten Zielressourcen (extrahierte Bildmerkmale) zu vergleichen und zu erkennen. Die robuste Erkennung des Gebäudegrundrisses ist für das AR-Softwarewerkzeug essenziell, da das digitale Gebäudemodell auf einem 2D-Grundriss der Fabrik augmentiert wird (Abb. 35), um zusätzliche, in der 2D-Ansicht nicht enthaltene Informationen anzuzeigen. Nach der Erkennung des Markers (Grundriss) werden die BIM-Daten auf den Grundriss augmentiert. Als mobiles Visualisierungs- und Eingabegerät, das es ermöglicht, mit dem AR-Modell zu interagieren, wird das iPad Pro (12,9 Zoll, 3. Generation) ausgewählt.

Bei der Entwicklung des AR-Softwarewerkzeugs werden die genannten Prinzipien zur Informationsdarstellung und Anforderungen an die Anwendung wie folgt weiter spezifiziert: Das AR-Softwarewerkzeug soll die Möglichkeit bieten, Planungsänderungen einfach in das Softwarewerkzeug integrieren zu können. Außerdem soll sich das UI automatisiert auf die jeweilige Displaygröße des verwendeten Endgerätes (Tablet oder Smartphone) anpassen und eine Plattformneutralität (iOS oder Android) gewährleisten.

Damit es möglich ist, in das AR-Softwarewerkzeug auch während der Umbauphase notwendige Planungsänderungen schnell zu integrieren, wird in Unity (verwendete Entwicklungsumgebung) ein Skript zum Speichern von Klassen, Objektlisten und Zeitlisten verwendet. Die Zeitlisten sind mit dem Schieberegler im UI verknüpft (Abb. 36, rechts). Je nach ausgewähltem Zeitpunkt der Bauablaufplanung werden die verknüpften Gebäudeobjekte ein- oder ausgeblendet. Das Skript ist so konzipiert, dass BIM-Objekte der Fabrik per Drag & Drop anpassbar sind. Bei Planungsän-



derungen durch Fachplaner können somit Änderungen auch von BIM-Planern selbst in die Anwendung integriert werden. Zur automatisierten Skalierung des UI, angepasst an das verwendete Endgerät, kommt das Responsive UI-Design-Konzept [Voutilainen et al. 2015, S. 60 f.] zum Einsatz. Die für die Umplanung erforderlichen BIM-Objekte (aus der Produktion oder dem Industriebau, Abb. 36) können im UI (Abb. 36, links) ausgewählt und somit dargestellt werden. Außerdem erfolgt die Entwicklung so, dass neben der reinen Augmentierung der Geometrie auch zusätzliche Informationen wie Attributinformationen zu Bauteilen bzw. Projektinformationen, der Terminplan, die zum Umplanungsfall zugehörige Kostenkalkulation oder Vertragsinformationen im UI ausgewählt (Abb. 36, links) und angezeigt werden können.



Abb. 35: AR-Softwarewerkzeug während der Anwendung

Über das UI des Softwarewerkzeugs im rechten unteren Bildschirmbereich (Abb. 35) können die für die Entscheidung notwendigen Informationen abgerufen werden (Abb. 36). Für das geometrische Gebäudemodell kann durch eine Dropdown-Liste der jeweilige LOD ausgewählt werden (Abb. 36, links). Es ist außerdem möglich das augmentierte Fabrikgebäudemodell in mehreren Stufen transparent zu schalten (Abb. 36, - und +), um den Fokus auf die vom Umbau betroffenen Gebäudebauteile, die weiterhin opak dargestellt werden, zu richten. Beim Anwählen des Reiters

für unterschiedliche Planungsvarianten (Szenarien) werden die Termin- und Kosteninformationen stets in Abhängigkeit vom gewählten Szenario angezeigt. So ist es möglich, eine Entscheidung über bspw. verschiedene dargestellte Umbauszenarien zu treffen. Die Entscheidung wird durch die angezeigten Informationen unterstützt.

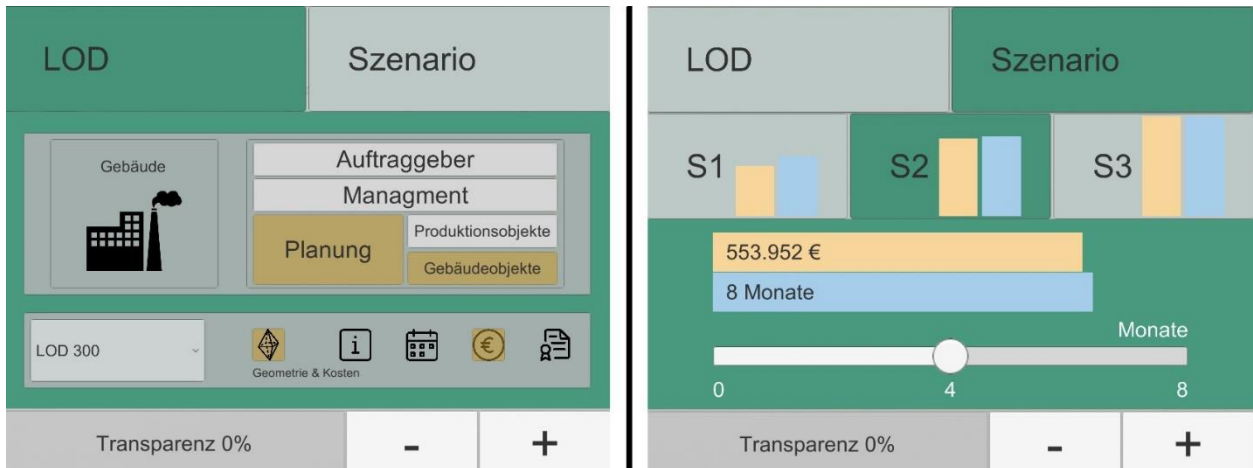


Abb. 36: User Interface des AR-Softwarewerkzeugs

Ein Vergleich der Umbauszenarien ist nicht nur hinsichtlich des Terminplans und der Kosten möglich, sondern kann auch bezüglich der räumlichen und baulichen Ausführung und des optischen Eindrucks beurteilt werden. Die dreidimensionale Augmentierung vermittelt einen Eindruck, der mit einem zweidimensionalen Grundriss nicht dargestellt werden kann.

Die zu Beginn ausgewählten Komponenten des AR-Softwarewerkzeuges führen zu den in Abb. 37 dargestellten Prozessschritten. Nach Start des AR-Softwarewerkzeuges wird der AR-Marker, der im vorliegenden Fall einen Grundriss der Fabrik darstellt, im Kamerasichtfeld des Tablets positioniert. Durch das Tracking werden die geladenen BIM-Daten lagerichtig auf dem Grundriss angezeigt. Anschließend können relevante Informationen über die Interaktion mit dem UI eingeblendet werden (Abb. 37).

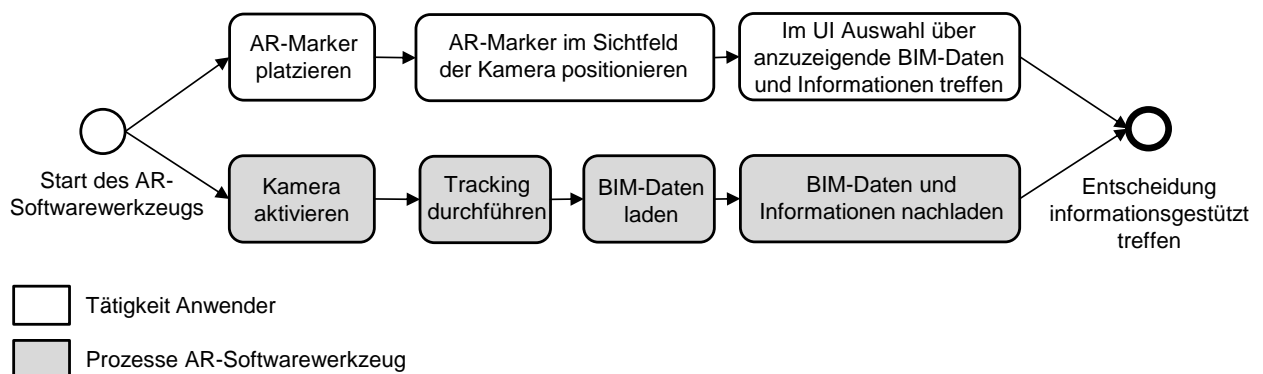


Abb. 37: Gesamtprozess der Anwendung des AR-Softwarewerkzeuges

Für den Einsatz des AR-Softwarewerkzeugs sind die Dateiformate des BIM-Modells relevant, die von den Fachplanern bereitgestellt werden, um die Modelle für den Einsatz in der AR-Anwendung umzuwandeln. Ein für das AR-Softwarewerkzeug geeignetes und in Unity importierbares Format ist das FBX-Format. Für weiterführende Informationen zu den mit den jeweiligen Dateiformaten verbundenen Workflows zur Umwandlung wird auf [Hellmuth et al. 2020a, S. 160] verwiesen. Ergebnis der Methode 4 ist das AR-Softwarewerkzeug.

Mit dem entwickelten AR-Softwarewerkzeug soll es möglich sein, Baubesprechungen unter Verwendung der aktualisierten Gebäudemodelle auf der Baustelle visuell und informativ zu unterstützen, indem relevante Informationen vor Ort eingeblendet werden. Die visuelle Darstellung der dritten Dimension (Höhe) soll für die beteiligten Planer auf der Baustelle förderlich sein, wenn es darum geht, Planungsfehler frühzeitig zu erkennen oder Umbauvarianten zu bewerten. Infolge der hohen Verfügbarkeit von Smartphones und Tablets in Unternehmen eignet sich das vorgestellte AR-Softwarewerkzeug, um ohne zusätzliche Investitionen in Hardware eingesetzt werden zu können. Erkenntnisse zur visuellen Unterstützung im Vergleich zu zweidimensionalen Tools bei der Fabrikumbauplanung liefert die Validierung in Kapitel 6.

## 5.5 Zwischenfazit

Die Methodik zur Unterstützung der Fabrikumbauplanung auf der Grundlage von aktuellen digitalen Fabrikgebäudemodellen ist so entwickelt, dass der Prozess der Fabrikumbauplanung sowohl methodisch als auch durch den Einsatz von Softwarewerkzeugen unterstützt wird (Abb. 38). Als Folge ist es möglich die Einzelmethode sowohl sequenziell entlang des Prozesses der Fabrikumbauplanung (Abb. 38) als auch unabhängig voneinander einzusetzen.

Damit die BIM-Objekte der Fabrik aktuell sind, wird in Methode 1 eine auf Photogrammetrie basierende Aktualisierungsmethode entwickelt (Abb. 38). Die Aktualisierungsmethode ermöglicht es, basierend auf den tatsächlich identifizierten baulichen Veränderungen (Änderungsdetektion), die vorhandenen Bestandsmodelle (Punktwolken und BIM-Modelle) aktuell zu halten. Die zweite Methode basiert auf der Modullandkarte der zustandsbasierten Fabrikplanung nach [Nöcker 2012] und dem Vernetzungsmodell der integrativen Fabrikplanung nach [Meckelnborg 2015, S. 101] und nutzt die darin entwickelten Planungsmodule [Meckelnborg 2015, S. 225–256] und deren Wechselwirkungen. Unter Verwendung der Planungsmodule können durch den Einsatz des entwickelten Softwarewerkzeugs, das auf dem entwickelten Modell der Interdependenzen basiert, die Auswirkungen auf die Fabrikobjekte identifiziert werden (Kapitel 5.2). In Methode 3 wird das Requirements Engineering aus der Softwareentwicklung aufgegriffen und angepasst (Abb. 38). Mithilfe der Informationsanforderungserhebung (Methode 3) soll es ermöglicht werden, die

Informationsanforderungen der Umbaubeteiligten an das digitale Fabrikgebäudemodell zu erfassen und die Anforderungen mit den für den Umbau erforderlichen BIM-Objekten zu verknüpfen. Somit können die für die Fabrikumbauplanung benötigten Informationen erhoben werden.

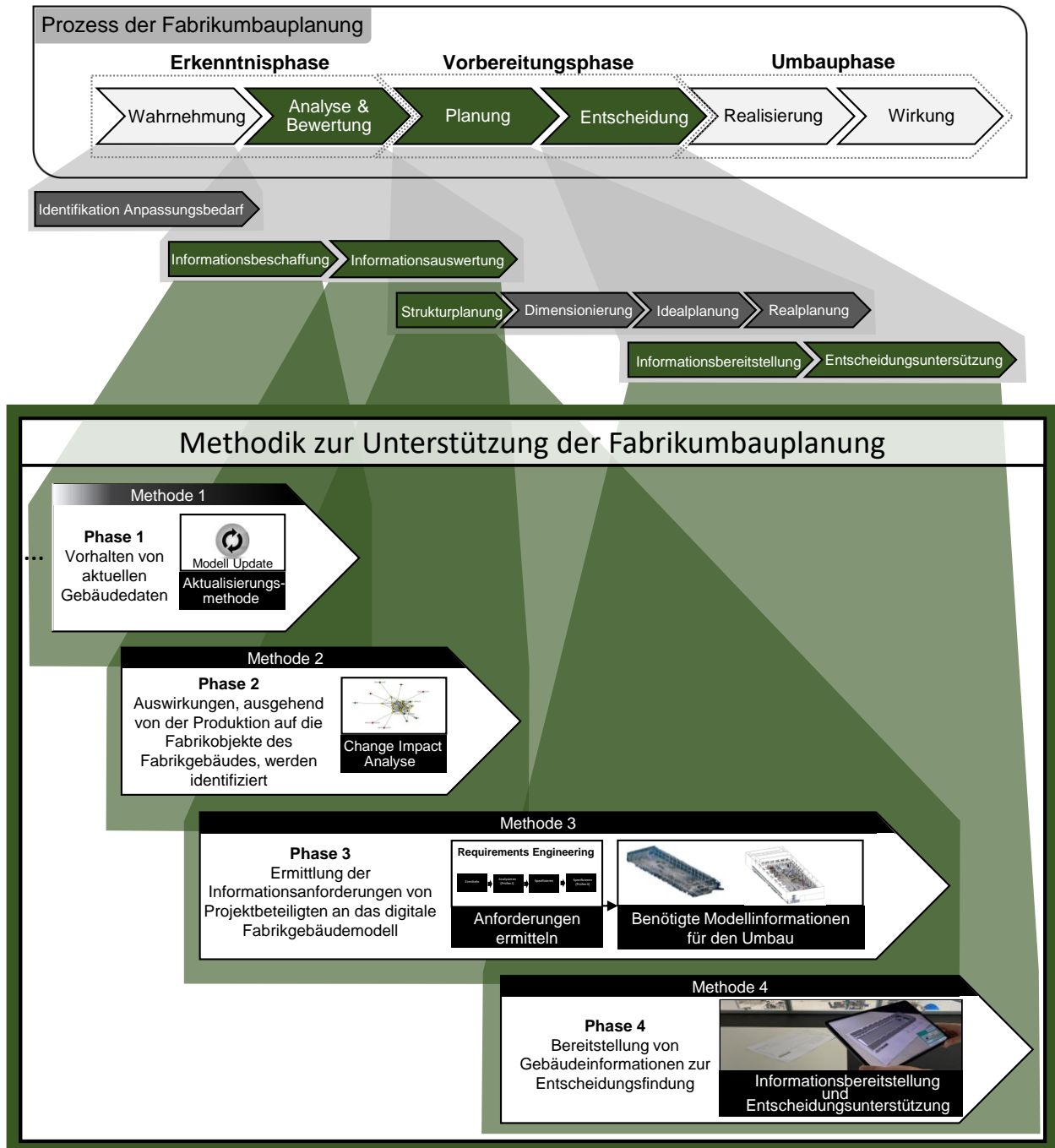


Abb. 38: Überblick über die dem Prozess der Fabrikumbauplanung zugeordneten Methoden

Abschließend erfolgt der Zugriff auf die aktuellen Modelle in Methode 4, um diese mobil in der Fabrik am Umbauort und somit kontextrelevant den Planungsbeteiligten durch ein AR-Softwarewerkzeug zur Verfügung zu stellen. Das AR-Softwarewerkzeug bündelt und visualisiert alle für den Umbau relevanten Informationen und unterstützt so die schnelle Entscheidungsfindung auf einer belastbaren Informationsgrundlage. Inwiefern sich die entwickelten Methoden für die Anwendung eignen, soll sich im folgenden Kapitel im Rahmen einer Verifikation und Validierung der Methoden zeigen.

## 6 Verifikation und Validierung der Methodik

Die entscheidende Notwendigkeit realwissenschaftlicher Forschung ist es, Methoden und Werkzeuge zur Klärung realer Sachverhalte zu entwickeln. Der auf einem iterativen Vorgehen basierende Forschungsprozess beginnt und endet daher hier im Anwendungszusammenhang der Fabrikumbauplanung.

Die in Kapitel 4 und Kapitel 5 entwickelte Methodik zur Unterstützung der Fabrikumbauplanung, mit den beinhalteten Einzelmethoden (Abb. 39), soll angewandt und verifiziert bzw. validiert werden. Die Beziehungen und das Zusammenspiel zwischen den Einzelmethoden sind in Abb. 39 dargestellt. Die Aktualisierungsmethode liefert das aktualisierte digitale Fabrikgebäudemodell, was in Methode 4 (Informationsbereitstellung) visualisiert wird. Die Change Impact Analyse (Methode 2) gibt Aufschluss über die betroffenen Fabrikobjekte, die als Input für die Informationsanforderungserhebung (Methode 3) und die Informationsbereitstellung (Methode 4) verwendet werden (Abb. 39). Die Informationsanforderungserhebung überprüft zunächst, ob das existierende digitale Fabrikgebäudemodell alle für den Fabrikumbau benötigten Informationen beinhaltet. Anschließend werden die für den Umbau benötigten Modellinhalte konkretisiert und können somit in der Informationsbereitstellung (Methode 4) verwendet werden (Abb. 39). Die Methode zur Informationsbereitstellung (Abb. 39) bündelt alle Informationen der vorhergehenden Methoden und stellt diese dem Planungsteam vor Ort bereit.

Aufgrund von Geheimhaltungsvereinbarungen von Ingenieurbüros für Fabrikplanung, die den Zugriff Externer auf Planungsunterlagen ausschließen und der erheblichen Zeitspanne von Fabrikumplanungsprojekten konnte die Methodik nicht an einem durchgängigen Fabrikumplanungsprojekt validiert werden. Dementsprechend erfolgt für die Einzelmethoden in den nachfolgenden Unterkapiteln ein individuell auf die jeweilige Methode zugeschnittenes Verifikations- bzw. Validierungsvorgehen, das auf definierten Verifikations- bzw. Validierungszielen basiert.

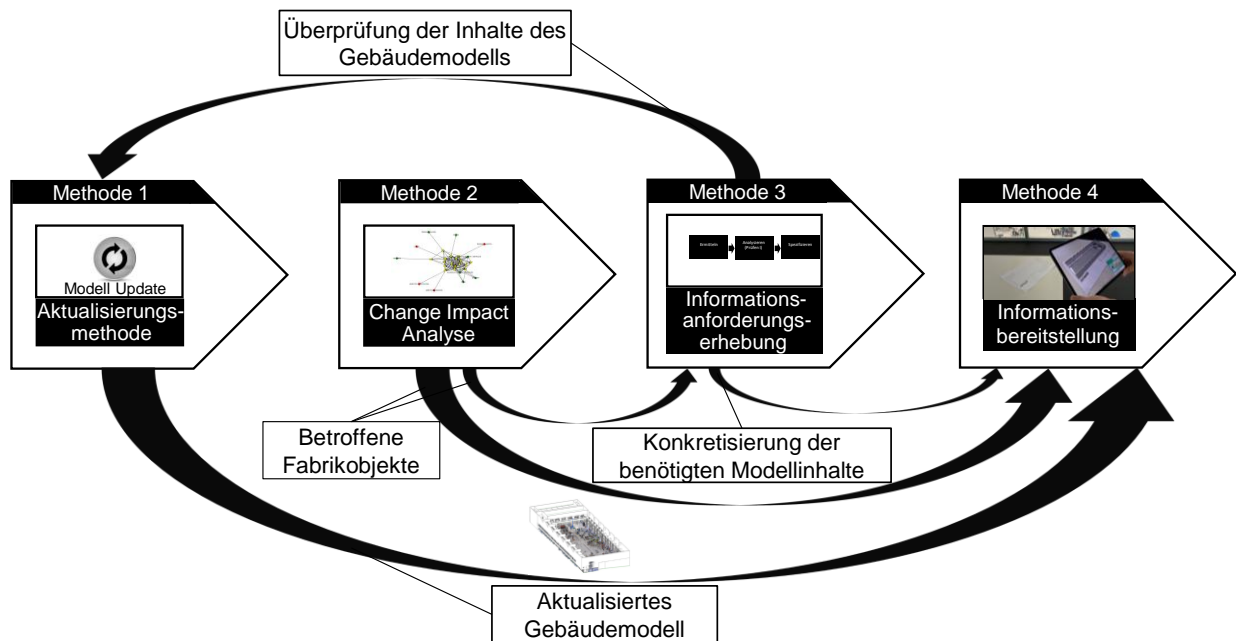


Abb. 39: Zusammenhänge der Einzelmethoden innerhalb der Gesamtmethodik

Die Methode 1 (Aktualisierungsmethode) wird anhand eines Verfahrensvergleichs in einer Fallstudie validiert. Die Studie spiegelt einen repräsentativen Aktualisierungsfall aus der Praxis in einem Technikraum wider und erlaubt, die Praxistauglichkeit durch eine anschließende Bewertung zu validieren. Ziel der Validierung ist es, den entwickelten Aktualisierungsprozess der Punktwolke, der auf Photogrammetrie basiert, mit einem in der Praxis verbreiteten Aktualisierungsprozess durch Laserscanner hinsichtlich der Aufnahmedauer vor Ort, Dauer der Nachbearbeitung, der Gerätekosten, der entstehenden Dateigrößen und der erreichten Qualität der Punktwolken zu vergleichen. Die Methode 2 (Change Impact Analyse) soll anhand von Fallstudien validiert werden. Validierungsziel ist es, zu ermitteln, wie zuverlässig die Auswirkungen von Veränderungen automatisiert durch die entwickelte Change Impact Analyse identifiziert werden können. Für Methode 3 (Informationsanforderungserhebung) erfolgt eine formale Verifizierung, mit dem Ziel, die gestellten Anforderungen zu überprüfen und zu dokumentieren, dass die Erhebungstechnik frei von Widersprüchen ist. Ausgehend vom Validierungsziel der Methode 4 (Informationsbereitstellung), mögliche Vorteile des AR-Softwarewerkzeugs bei der räumlichen Einschätzung von Umbaumaßnahmen zu identifizieren, werden die Dimensionen der Wiedergabetreue des AR-Softwarewerkzeugs mit einem in der Praxis üblichen 2D-Tool verglichen.

Die in der Methodik entwickelten methodischen Vorgehensweisen und Softwarewerkzeuge werden während der Verifizierung und Validierung somit ausführlich erprobt und die bei der Anwendung diagnostizierten Erfahrungen bewertet.

## **6.1 Validierung Methode 1**

Zur Validierung von Methode 1 wird die Aktualisierungsmethode anhand einer Fallstudie und mit Hilfe einer Bewertung der Praxistauglichkeit durch Experten geprüft. In der Fallstudie sollen zunächst grundlegende Daten für die Aktualisierung kleinteiliger Objekte gesammelt werden. Der entwickelte Aktualisierungsprozess via Photogrammetrie wird mit der in der Praxis etablierten zyklischen Aktualisierung durch Laserscans verglichen. Anschließend wird die Aktualisierungsmethode, mit den Daten aus der Fallstudie, einem Unternehmen vorgestellt und eine Bewertung der Praxistauglichkeit durch Fachpersonal vorgenommen.

Um im Rahmen der Validierung eine Falsifizierung durchführen zu können, wird die Hypothese aus Kapitel 1.4 zu Methode 1 „Photogrammetrische Aktualisierungen von digitalen Fabrikgebäudemodellen sind hinsichtlich „Aufnahmedauer vor Ort“, „Dauer der Nachbearbeitung“, der „Gerätekosten“, der „Genauigkeit“ und der entstehenden „Dateigröße“ im Vergleich zu Aktualisierungen via Laserscans für die Praxis relevant“ herangezogen. Gemäß der Überprüfung ihrer Validität ist diese Hypothese zur Relevanz der photogrammetrischen Aktualisierung durch das Anstreben einer Falsifizierung zu testen. Sofern die Falsifizierung nicht gelingt, kann die Hypothese aufrechterhalten werden.

Bei der Auswahl des produzierenden Unternehmens, das die Praxistauglichkeit bewertet, ist darauf zu achten, dass digitale Fabrikgebäudemodelle in der Betriebsphase eingesetzt werden. Beim Einsatz von digitalen Fabrikgebäudemodellen in der Betriebsphase liefert der Vergleich zwischen existierenden Aktualisierungsaktivitäten und dem vorgeschlagenen Aktualisierungsvorgehen verwertbare Ergebnisse. Bei der Auswahl des Fachpersonals, das befragt wird, ist darauf zu achten, dass dieses einen möglichst vollständigen Überblick über Aktualisierungen des digitalen Fabrikgebäudemodells im eigenen Unternehmen besitzt. Zur Bewertung der Praxistauglichkeit werden den Befragten die Grundzüge und die Ergebnisse aus der Fallstudie (Kapitel 6.1.1) der vorgeschlagenen Aktualisierungsmethode erläutert. Die Überprüfung der Hypothese erfolgt schlussendlich durch die Bewertung der Praxistauglichkeit der vorgeschlagenen Aktualisierungsmethode durch den befragten Experten. Die Ergebnisse der Befragung des Experten aus der Praxis werden in einem Fragebogen festgehalten und dokumentiert (Anhang G, Tab. G.5).

### **6.1.1 Fallstudie zum Verfahrensvergleich**

Zur Validierung des Aktualisierungsprozesses wird mit einem Unternehmen, das Laserscanner herstellt, eine Fallstudie durchgeführt. Der Aktualisierungsprozess wird anhand des Einbaus eines Filters in eine Zuluftleitung in einem für alle Beteiligten Personen zugänglichen Technikraum



getestet. Bei der Auswahl des Objekts war die Zugänglichkeit über einen längeren Zeitraum entscheidend, da der Fokus auf dem Verfahrensvergleich mit insgesamt fünf unterschiedlichen Aufnahmegeräten liegt. Das Ergebnis des Verfahrensvergleichs ist für jedes Objekt einer Fabrik repräsentativ, da die Geometrie oder der Ort des Objektes keinen Einfluss auf das Ergebnis in Hinblick auf die untersuchten Merkmale hat. Wesentlich ist daher nicht das Objekt an sich, an dem der Aktualisierungsprozess validiert wird, sondern die Ergebnisse des Verfahrensvergleichs, die Aufschluss über die Eignung des vorgeschlagenen Aktualisierungsprozesses in Bezug auf die partiellen, kleinteiligen Veränderungen liefern. Ziel ist es, den entwickelten Aktualisierungsprozess, der auf photogrammetrischen Aufnahmen basiert (Kapitel 5.1), mit dem in der Praxis von Vermessungsingenieurbüros häufig zur Aktualisierung verwendeten Verfahren, dem Laserscanning, zu vergleichen. Im Einzelnen gilt zu klären, ob die photogrammetrische Aktualisierung die Anforderungen erfüllt, die diese einhalten soll: Kurze Aufnahmezeit vor Ort, Einsatz kostengünstiger Hardware und das Erreichen einer hohen Genauigkeit (Kapitel 4.1). Dazu wird der photogrammetrische Aktualisierungsprozess hinsichtlich Dauer – Aufnahmezeit, Dauer – Nachbearbeitung der Daten, Gerätekosten, entstehende Dateigrößen, Qualität – Punktdichte sowie Qualität – Genauigkeit der 3D-Punktkoordinaten der entstehenden Punktwolken analysiert und einem Aktualisierungsprozess, durchgeführt mit Laserscannern, gegenübergestellt. Für die Validierung des Aktualisierungsprozesses werden für die Photogrammetrie drei Aufnahmegeräte verwendet: Eine Spiegelreflexkamera (Nikon D810) und zwei Smartphones (iPhone XS und iPhone 6). Um zu testen, ob der photogrammetrische Aktualisierungsprozess auch mit älteren Smartphones funktioniert, kommt im Aktualisierungsprozess auch ein iPhone 6 zum Einsatz. Dies hat den Hintergrund, dass der photogrammetrische Aktualisierungsprozess für Servicepersonal vor Ort ausgelegt ist. Es gilt somit zu prüfen, inwieweit ältere Endgeräte einsetzbar sind. Als Photogrammetrie-Software wird RealityCapture verwendet. Begründet wird diese Festlegung dadurch, dass eingehende Tests und Vergleiche mit anderen Photogrammetrie-Softwares durchgeführt wurden und Vorteile bei Reality Capture hinsichtlich Berechnungszeit und Qualität identifiziert werden konnten [Hellmuth et al. 2020b, S. 284], [Hellmuth et al. 2020c, S. 5].

Zur Durchführung der Laserscans wird der FARO Focus<sup>S</sup> 350 (terrestrischer Laserscanner) und der Faro Freestyle 2 (handgeführter Laserscanner) verwendet. Die Laserscandaten werden anschließend in der Software FARO SCENE verarbeitet und zusammengeführt.

Für die initiale Änderungsdetektion wird eine automatisierte Änderungserkennung angewandt (Abb. 40). Hierfür kommt die TensorFlow Object Detection API Version r1.12 zum Einsatz. Zur Überwachung des Technikraumes wird eine GoPro HERO 8 Kamera ausgewählt. Die Aufzeichnung der Kamera liefert den Dateninput für die entwickelte Änderungserkennung. Auf der linken Seite von Abb. 40 ist der ursprüngliche Zustand des Raumes und der technischen Ausstattung zu sehen. Rechts ist die Installation des Filters zu erkennen. Der in der Zuluftleitung hinzugefügte Filter wird nach einer festgelegten Dauer vom Objektdetektor mit einer Wahrscheinlichkeit von

100 % als dauerhafte bauliche Veränderung identifiziert und als verändertes Objekt gekennzeichnet (Abb. 40). In diesem Fall ist die Videoüberwachung eines Technikraumes einfach zu realisieren. Bei größeren und verwinkelten Räumen oder ganzen Gebäuden ist die Videoüberwachung wesentlich komplexer.

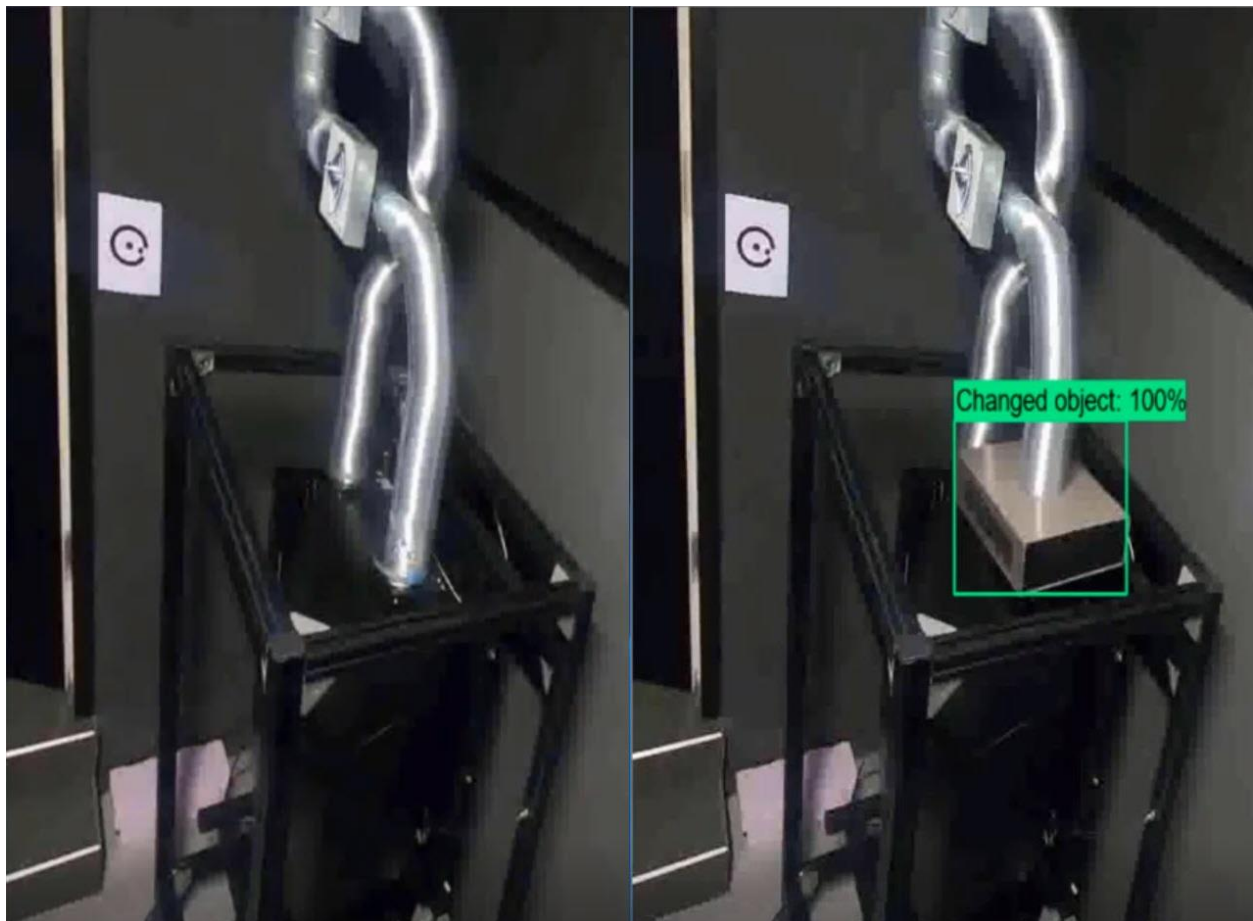


Abb. 40: Änderungsdetektion via Objekterkennung

Anschließend wird die erkannte Änderung (Einbau Filter) im Technikraum (Abb. 40) zur Validierung des „Aktualisierungsprozess Punktwolke“ mit verschiedenen Aufnahmegeräten erfasst. Wird die Aufnahmezeit vor Ort betrachtet, ergibt sich für den FARO Focus<sup>s</sup> 350 eine Aufnahmezeit für die Datensätze D1 bis D4, die zwischen 10:26 Minuten und 13:55 Minuten liegt (Tab. 4). Die vier Datensätze entstehen durch unterschiedliche Einstellungen des Laserscanners und zweier Beleuchtungsvarianten (Anhang G: Tab. G.3). Mit dem terrestrischen Laserscanner erfolgt die Aufnahme von zwei Scanpositionen. Während der Platzierung der Laserscanner ist die Position (Höhe und Lage) zu beachten, da eine ungünstige Positionierung Abschattungen bewirkt und dadurch erforderliche Elemente im Aufnahmebereich fehlen. Daher erfolgt die Wahl der Scanposition abhängig vom Objekt, das aktualisiert werden soll. Variiert wird in der vorliegenden Fallstudie die Spiegelhöhe des Laserscanners (65 cm und 123 cm) sowie die Position des Laserscan-

ners auf der Längsachse des Technikraumes. Für den verwendeten Handscanner (FARO Freestyle 2) ergibt sich eine Aufnahmezeit von ca. 05:05 Minuten (Tab. 4). Dies ist die schnellste Aufnahmezeit vor Ort unter allen verwendeten Geräten.

Bei allen photogrammetrischen Aufnahmen wird mit jedem Aufnahmegerät eine Aufnahmezeit von 08:30 Minuten eingehalten (Tab. 4), um so eine Vergleichbarkeit der photogrammetrischen Ergebnisse zwischen den verwendeten Geräten zu gewährleisten. Aus vorhergehenden Tests geht hervor, dass bei einer längeren Aufnahmezeit zwar geringfügig höhere Qualitäten der Punktwolken erzielt werden können, jedoch das Verhältnis zwischen zusätzlicher Aufnahmezeit und geringfügiger Qualitätssteigerung nicht mehr zielführend ist [Hellmuth et al. 2020b, S. 283]. Die Aufnahmezeit vor Ort sollte im Einzelfall jedoch immer an die aufzunehmenden Objekte angepasst werden. Trotz der durchgehend gleichen Aufnahmezeit (Photogrammetrie) wird eine unterschiedliche Anzahl an Fotos je Aufnahmegerät erstellt (Anhang G, Tab. G.2).

Tab. 4: Vergleich der Dauer - Aufnahmezeit vor Ort

Dauer	Aufnahme					
	Laserscan			Photogrammetrie		
	FARO Focus <sup>S</sup> 350	FARO Freestyle 2	Nikon D810	iPhone XS	iPhone 6	
	[hh:mm:ss]	[hh:mm:ss]	[hh:mm:ss]	[hh:mm:ss]	[hh:mm:ss]	[hh:mm:ss]
D1	00:13:55		D1	00:08:30		
D2	00:10:26		D2	00:08:30		
D3	00:13:55		D3	00:08:30		
D4	00:10:26					
			D1		00:08:30	
D1		00:05:04	D2		00:08:30	
D2		00:05:05	D3		00:08:30	
			D1			00:08:30
			D2			00:08:30
			D3			00:08:30

Die Nachbearbeitung der Ergebnisse ist bei beiden Verfahren grundsätzlich verschieden (Tab. 5). Die Nachbearbeitung der Punktwolken der Laserscans besteht aus der automatisierten Registrierung der Einzelscans. Die Registrierung der Punktwolke erfolgt mit der FARO SCENE Software und ist bei beiden Laserscannern (FARO Focus<sup>S</sup> 350 und FARO Freestyle 2) in wenigen Minuten durchgeführt (Tab. 5). Im Gegensatz dazu werden bei der Photogrammetrie die Aufnahmen genutzt, um mit der Software RealityCapture das 3D-Modell des Aktualisierungsbereichs zu berechnen. Dieser Prozess ist mit seinen einzelnen Teilschritten (Ausrichten der Fotos, Berech-

nung der Punktwolke, Texturierung, Abb. 23) deutlich zeitaufwändiger (Tab. 5). Je nach Aufnahmegesetz und der damit verbundenen Dateigröße der Fotos variiert die Nachbearbeitung zwischen 28 Minuten und über 2 Stunden (Tab. 5).

Tab. 5: Vergleich der Dauer - Nachbearbeitungszeit

Dauer							
Nachbearbeitung							
	Laserscan			Photogrammetrie			
		FARO Focus <sup>S</sup> 350	FARO Freestyle		Nikon D810	iPhone XS	iPhone 6
		[hh:mm:ss]	[hh:mm:ss]		[hh:mm:ss]	[hh:mm:ss]	[hh:mm:ss]
D1		00:02:36		D1	01:45:21		
D2		00:03:25		D2	02:12:01		
D3		00:03:02		D3	01:30:01		
D4		00:03:30					
	D1		00:02:16	D1		01:45:11	
	D2		00:02:17	D2		01:32:03	
				D3		01:05:33	
				D1			00:36:03
				D2			00:37:11
				D3			00:28:25

Hinsichtlich der Gerätekosten existieren große Unterschiede. Der terrestrische Laserscanner FARO Focus<sup>S</sup> 350 ist mit Abstand das Gerät mit dem höchsten Preis (Tab. 6). Der Handscanner FARO Freestyle 2, der sich für den vorliegenden Aktualisierungsfall gut eignet, ist der Laserscanner mit niedrigerem Preis (Tab. 6). Die verwendete Spiegelreflexkamera Nikon D810 ist das Aufnahmegesetz in der Kategorie „Photogrammetrie“ mit dem höchsten Preis. Hier ist zu erwähnen, dass für die Aufnahmen mit der Spiegelreflexkamera zusätzlich ein Objektiv (SIGMA Art 24mm F1.4 DG HSM) verwendet wird, das zusätzlich Kosten von ca. 750 € verursacht. Deutlich niedrigere Preise weisen die beiden verwendeten Smartphones auf (Tab. 6).

Tab. 6: Vergleich der Gerätekosten

Kosten								
Gerätekosten								
Laserscan				Photogrammetrie				
		FARO Focus <sup>S</sup> 350	FARO Freestyle			Nikon D810	iPhone XS	iPhone 6
		[€]	[€]			[€]	[€]	[€]
		ca. 56.000 €				ca. 1.227 €		
			ca. 17.500 €				ca. 559 €	
								ca. 199 €

Bei der entstehenden Datenmenge ist zu beachten, dass die zu verarbeitende Datenmenge für Softwareanwendungen aufgrund der Hardwareausstattung des PCs limitiert ist. Daher sind kleinere Dateigrößen zu bevorzugen. Für die Datenspeicherung der 3D-Punktwolken wird für alle Datensätze das Standardaustauschformat E57 verwendet. Es ist zu erwähnen, dass bei den Aufnahmen des terrestrischen Laserscanners deutlich mehr erfasste „Umgebung“ entsteht als bei den gezielten Aufnahmen mit dem Handscanner oder bei den photogrammetrischen Aufnahmen. Um diesem Umstand entgegenzuwirken, wird die „Umgebung“ durch einen Begrenzungsquader herausgeschnitten. Damit wird der Einfluss der „Umgebung“ auf die entstehende Dateigröße (Tab. 7) minimiert. Zusätzlich beeinflussen die jeweils gewählten Einstellungen (Anhang G, Tab. G.2, Tab. G.3) der verwendeten Geräte (Laserscanner und Kameras) die Dateigröße maßgeblich. Der Handscanner FARO Freestyle erzeugt mit Abstand die geringsten Dateigrößen (Tab. 7).

Tab. 7: Vergleich der entstehenden Datenmenge

Datenmenge								
Dateigröße								
Laserscan				Photogrammetrie				
		FARO Focus <sup>S</sup> 350	FARO Freestyle 2			Nikon D810	iPhone XS	iPhone 6
		[MB]	[MB]			[MB]	[MB]	[MB]
D1		302 MB		D1		736 MB		
D2		294 MB		D2		744 MB		
D3		309 MB		D3		726 MB		
D4		295 MB						
D1			37 MB	D1			246 MB	
D2			47 MB	D2			239 MB	
				D3			255 MB	
				D1				216 MB
				D2				230 MB
				D3				204 MB

Um die geometrische Qualität der Ergebnisse der verschiedenen Datensätze zu vergleichen, werden die Kriterien Punktdichte und die Genauigkeit der 3D-Punktkoordinaten (Referenz: Reales Objekt) herangezogen. Außerdem wird von jedem Datensatz ein Rendering erstellt (Anhang G, Tab. G.4), um die Weiterverwendbarkeit der Punktwolken anhand möglicher Fehlaustrichtungen beurteilen zu können.

Um die Qualität der Punktwolken zu vergleichen, wird zunächst die Punktwolkendichte analysiert. Die Punktwolkendichte ist ein Indikator für die Auflösung der Daten: eine höhere Dichte bedeutet mehr Informationen (hohe Auflösung), während eine geringere Dichte weniger Informationen bedeutet (niedrige Auflösung). In Abb. 41 wird die Analyse der Punktwolkendichte des Datensatzes D1 der Nikon D810 dargestellt. Insgesamt beinhaltet der Datensatz 12.299.679 Punkte. Einen Verweis auf die Punktdichte der verschiedenen Bereiche zeigt die Skala (Abb. 41, rechts) an. Rote Bereiche ( $\sim 4,8 \times 10^8$ ) weisen eine sehr hohe Punktdichte auf, grüne Bereiche ( $\sim 2,4 \times 10^8$ ) eine mittlere Punktdichte und die eher am Rand gelegenen blauen Bereiche weisen eine vergleichsweise niedrige Punktdichte ( $< 8 \times 10^7$ ) auf. Mithilfe der Software CloudCompare wird die Punktdichte angegeben, indem für jeden Punkt die Anzahl der Nachbarn  $N$  innerhalb einer Kugel mit einem Radius gezählt wird. Bei der vorliegenden Analyse wird für alle Datensätze die Punktdichte bzw. Volumendichte unter Berücksichtigung einer Kugel mit dem Radius 0,03 m angegeben. Der Datensatz D1 der Nikon D810 besitzt eine Volumendichte, die zwischen 0 und ca.  $4,8 \times 10^8$  Punkten liegt (Abb. 41). Die meisten Punkte liegen in dem Bereich von  $1,5 \times 10^8$  (Abb. 41).

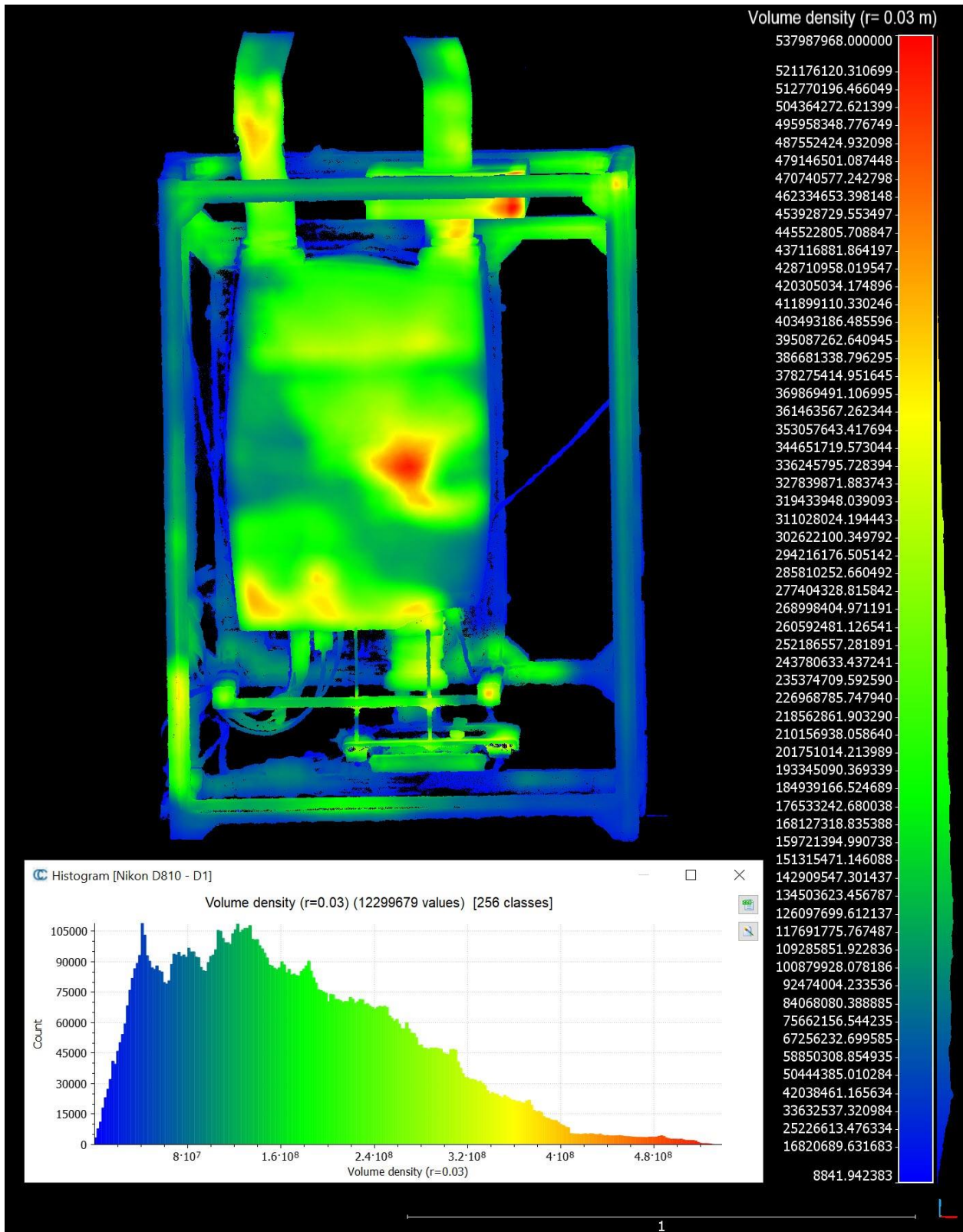


Abb. 41: Punktwolkendichte des Datensatzes D1 der Nikon D810

Im Vergleich dazu zeigt Abb. 42 die Analyse der Punktwolkendichte des Datensatzes D1 des FARO Focus<sup>S</sup> 350. Insgesamt beinhaltet der Datensatz 782.296 Punkte. Einen Verweis auf die Punktdichte der verschiedenen Bereiche zeigt die Skala (Abb. 42, rechts) an. Rote Bereiche weisen eine hohe Punktdichte ( $\sim 2,7 \times 10^7$ ) auf, grüne Bereiche eine mittlere Punktdichte ( $\sim 1,35 \times 10^7$ ) und die blauen Bereiche weisen eine vergleichsweise niedrige Punktdichte ( $< 4,5 \times 10^6$ ) auf. Der Datensatz D1 des FARO Focus<sup>S</sup> 350 besitzt bei einem Radius von 0,03 m eine Volumendichte, die zwischen 0 und ca.  $2,7 \times 10^7$  Punkten liegt. Die meisten Punkte liegen in dem Bereich von  $1,8 \times 10^7$  (Abb. 42).

Aus den Ergebnissen des Punktwolkendichtevergleichs wird deutlich, dass die photogrammetrischen Aktualisierungen bei entsprechendem Aufnahmegerät im Vergleich zum Laserscan sogar einen Qualitätsvorteil hinsichtlich der Punktwolkendichte aufweisen. Dies ist zum einen an der höheren Gesamtzahl der im photogrammetrischen Datensatz vorkommenden Punkte ersichtlich, zum anderen ist die durchschnittliche Punktdichte in der Punktwolke der Nikon D810 höher. Im Anhang G finden sich zusätzlich die Analysen der Punktwolkendichten des iPhone XS (Abb. G.1) und des FARO Freestyle (Abb. G.2).

Zur Bestimmung der relativen Genauigkeit der 3D-Punktkoordinaten aller Datensätze werden Messungen in der Punktwolke mit den Abmessungen des realen Objekts als Referenz verglichen. Für die Vergleiche werden in allen Datensätzen an den gleichen Objektbereichen (Traversen des Gestells, Abb. 40) durchgeführt. Die Genauigkeit der 3D-Punktkoordinaten liegt bei allen Datensätzen (Nikon D810: D1 - D3, iPhone XS: D1 - D3, iPhone 6: D1 - D3, FARO Focus S 350: D1 - D3 und FARO Freestyle: D1 – D3) an den nachgemessenen Stellen (Traversen des Gestells, Abb. 40) unter 10 Millimetern. Damit werden die in Kap. 4.1 geforderten Toleranzen ( $< 30$  mm) für Bauwerke eingehalten.

Bei der Analyse der Renderings (Anhang G, Tab. G.4) wird ersichtlich, dass die Ergebnisse der Nikon D810 insgesamt am besten abschneiden. Es gibt kaum Fehlausrichtungen. Bei den Datensätzen des iPhone 6 hingegen sind durchweg Fehlausrichtungen zu beobachten (Anhang G, Tab. G.4).



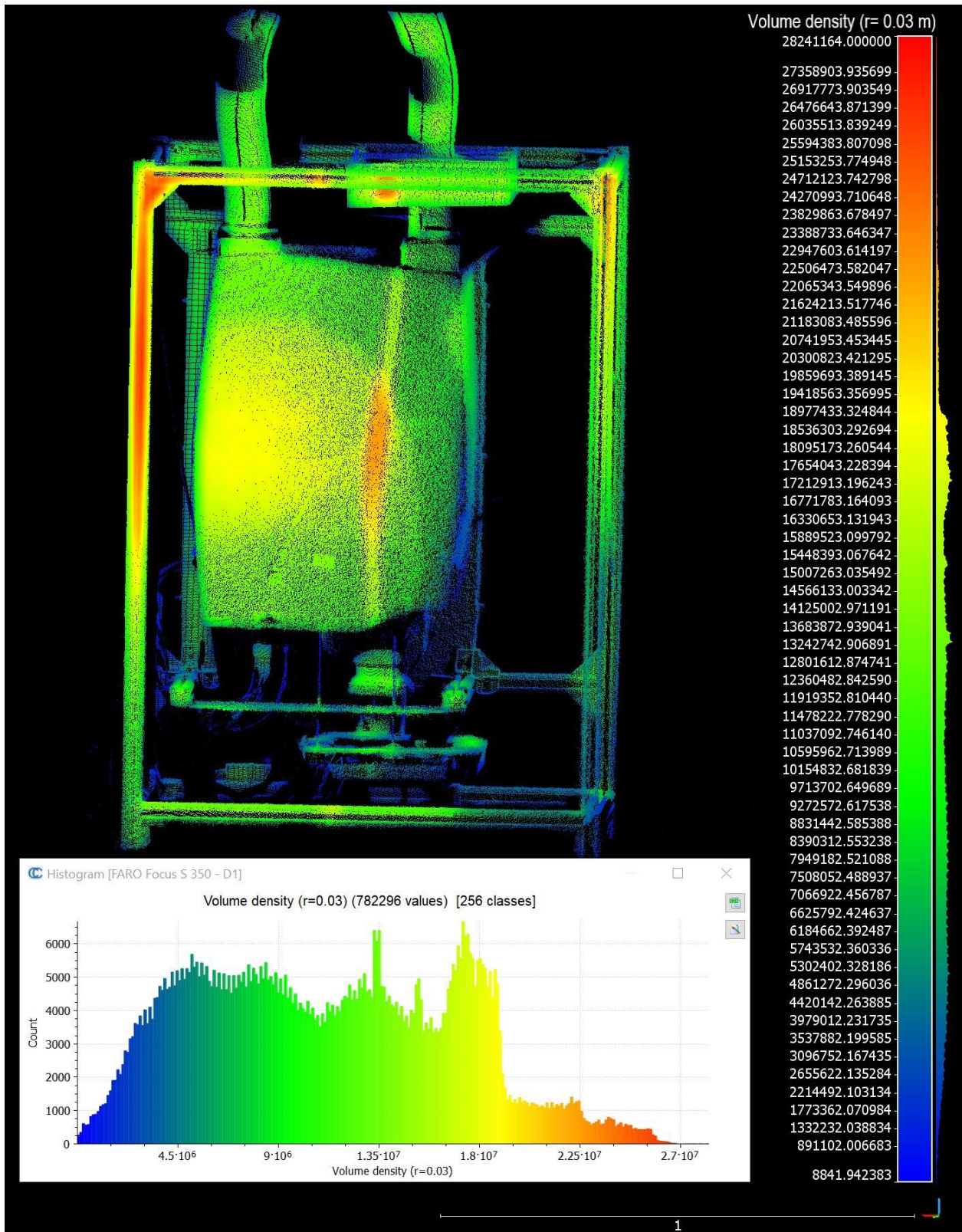


Abb. 42: Punktwolkendichte des Datensatzes D1 des FARO Focus<sup>S</sup> 350

Eine Weiterverwendung der berechneten 3D-Modelle des iPhone 6 ist daher nicht zu empfehlen. Aufgrund der starken Fehlausrichtungen wurden bei der Analyse der Punktdichte die Punktwolken des iPhone 6 nicht mitberücksichtigt. Die Ergebnisse des iPhone XS sind in 2 von 3 Datensätzen wiederverwendbar (Anhang G, Tab. G.4). Lediglich ein Datensatz (iPhone XS D2) weist große Fehlausrichtungen auf (Anhang G, Tab. G.4). Bei den Ergebnissen der beiden Laserscanner können keine Fehlausrichtungen festgestellt werden.

Als Analyse der Ergebnisse der Fallstudie zum Verfahrensvergleich ist festzuhalten, dass die verwendeten Handscanner hinsichtlich der Aufnahmedauer am schnellsten sind (Tab. 4). Die Aufnahme der photogrammetrisch erstellten Teilmodelle erfolgt jedoch nur geringfügig langsamer. Die Aufnahmen mit dem terrestrischen Laserscanner FARO Focus<sup>S</sup> 350 sind bei den kleinteiligen Aufnahmen am zeitaufwändigsten. Bei dem vorliegenden Fallbeispiel werden zwei Scanpositionen aufgenommen. Bei anderen Aktualisierungssituationen sind evtl. mehr Scanpositionen notwendig, um ein verwendbares Ergebnis zu erzielen, was die Aufnahmezeit des terrestrischen Laserscanners deutlich erhöhen würde. Beim Laserscanning lässt sich die zur Datenaufnahme erforderliche Zeit durch die Einstellung einer niedrigen Auflösung verringern. Zugleich reduziert die Wahl einer geringen Auflösung auch die Datenmenge der entstehenden Punktwolke und erfordert bei der Bearbeitung weniger Rechenleistung und Speicherkapazität. Der Anteil der manuellen Eingriffe während der Nachbearbeitung und Registrierung der aufgenommenen Punktwolken der Laserscans entscheidet über den damit verbundenen Zeitaufwand. Unterstützend ist es möglich, zur Registrierung Zielmarken zu verwenden. Diese wurden in der vorliegenden Fallstudie zwar angebracht, kamen jedoch nicht zum Einsatz, da eine automatisierte Registrierung erfolgreich durchgeführt werden konnte. Bei der Photogrammetrie hängt die Nachbearbeitungszeit hauptsächlich von der Größe der Fotos des jeweiligen Endgerätes ab. Bei niedrigen Dateigrößen der Fotos (z.B. iPhone 6) ist die Berechnung des 3D Modells zeitsparender (Tab. 5), das Ergebnis weist jedoch im Vergleich zu höheren Dateigrößen der Fotos Fehlausrichtungen auf (Anhang G, Tab. G.4). Zudem hat die Rechenleistung des verwendeten PCs (Anhang G, Tab. G.1) deutlichen Einfluss auf die Dauer der Nachbearbeitung der Scans und Fotos.

Zur Aktualisierung des BIM-Modells wird die aktuelle Partialpunktwolke (Umbaufaufnahme: Einbau Filter) in die Gesamtpunktwolke des Technikraumes integriert, indem die photogrammetrisch erzeugte Punktwolke der Nikon D810 (Datensatz D2) verwendet wird. Die korrekte Zusammenführung hinsichtlich der Skalierung und Ausrichtung der Punktwolken erfolgt in der Software RealityCapture mithilfe von Kontrollpunkten. Die aktualisierte Punktwolke wird anschließend verwendet, um das BIM-Modell in Autodesk Revit ebenfalls zu aktualisieren. Dabei leistet die aktualisierte Punktwolke eine Hilfestellung, um den eingebauten Filter in der richtigen Zuluftleitung, an der richtigen Stelle und korrekten Höhe modellseitig anzubringen. Nachfolgend wird in Abb. 43 die Überlagerung von BIM-Modell und Punktwolke gezeigt, die zur korrekten Positionierung des Filters im BIM-Modell verwendet wird.

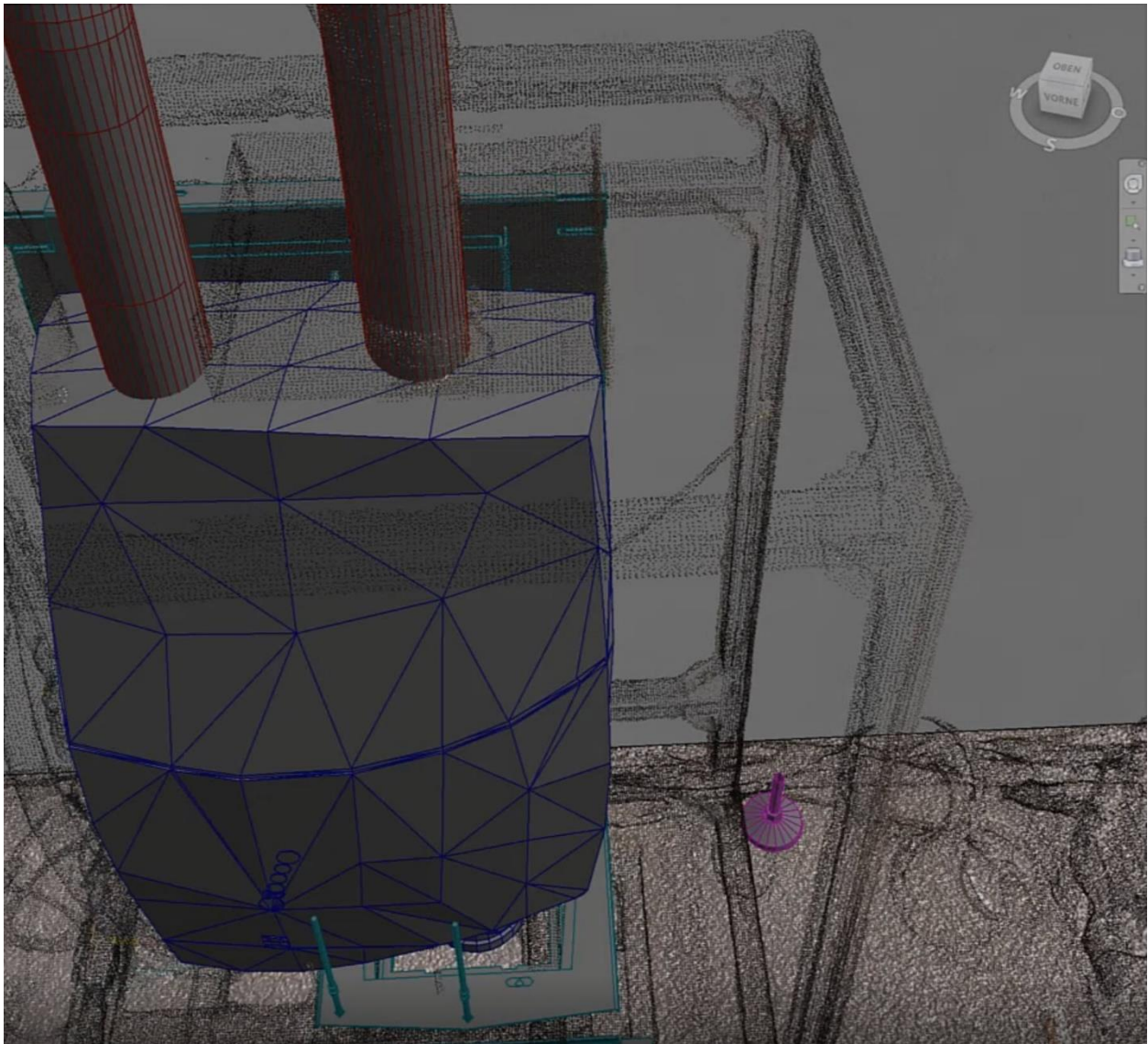


Abb. 43: Überlagerung BIM-Modell mit aktualisierter Punktwolke

### 6.1.2 Bewertung der Praxistauglichkeit

Durch die Bewertung der Praxistauglichkeit soll untersucht werden, ob die entwickelte Methode 1 für die Aufgabe zur Unterstützung der Aktualisierung digitaler Fabrikgebäudemodelle einsetzbar ist. Die Validierung erfolgt durch die Bewertung der vorgeschlagenen Aktualisierungsmethode durch einbezogene Anwender bzw. Fachexperten. Bei einer Vielzahl von kleinteiligen Aktualisierungen während der Betriebsphase von Fabriken ist die langfristige Validierung der vorgeschlagenen Aktualisierungsmethode allein durch Langzeitstudien nachzuweisen. Diesen Anspruch erfüllt die vorliegende Arbeit mit der Bewertung der Praxistauglichkeit nicht. Die messbaren Vergleichskriterien aus der Fallstudie zum Verfahrensvergleich (Kapitel 6.3.1) ermöglichen den Fachexperten somit eine initiale Abschätzung der Praxistauglichkeit.

Der für die Befragung von Experten genutzte Fragebogen findet sich in Anhang G (Tab. G.5). Eine Befragung wurde mit Fachexperten mit der Bezeichnung „Digital Factory Expert – Industrial Engineering“ eines produzierenden Unternehmens durchgeführt, das in der Betriebsphase digitale Fabrikgebäudemodelle einsetzt. Die Ergebnisse der Befragung sind im Anhang G (Tab. G.6) dokumentiert und werden anschließend kurz zusammengefasst.

Die Zusammenfassung der Befragung erfolgt unter Berücksichtigung des Datenschutzes und der Anonymität der interviewten Personen. Die Validierungsfragen wurden bei der Befragung im Nachgang der Vorstellung der entwickelten Aktualisierungsmethode als Single-Choice-Fragen und als offene Fragen gestellt (Anhang G: Tab. G.5). Die befragten Fachexperten bewerteten alle Informationsqualitätsdimensionen als „sehr relevant“. Bei der Beschreibung des derzeit im Unternehmen eingesetzten Vorgehens zur Aktualisierung von digitalen Modellen der Fabrik wurde angegeben, dass Aktualisierungen für die Neu- und Umbauplanung eingesetzt werden. Der Fokus liegt hierbei auf dem Produktionsbereich, wobei das Fabrikgebäude z. T. miteinbezogen wird. Als Hardware zur Aktualisierung wird ein Laserscanner (Leica BLK 360) eingesetzt. Die entstehende Punktwolke wird wie im vorgeschlagenen Aktualisierungsprozess als Modellierungsgrundlage in der eingesetzten BIM-Software verwendet. Im Vergleich zu dem im Unternehmen eingesetzten Aktualisierungsvorgehen und basierend auf den vorgestellten Testergebnissen wird die in der vorliegenden Arbeit entwickelte Aktualisierungsmethode als zweckmäßig eingestuft (Anhang G, Tab. G.6). Die Hypothese wird somit aufrechterhalten.

## **6.2 Validierung Methode 2**

Zur Validierung von Methode 2 wird die Change Impact Analyse anhand von Fallstudien praxisnah geprüft. Das Ziel der Validierung ist es zu ermitteln, wie zuverlässig Auswirkungen von Veränderungen automatisiert durch die entwickelte Change Impact Analyse identifiziert werden können. Die Identifikation von Auswirkungen bedeutet in diesem Kontext, dass eine Vorhersage der von den Veränderungen betroffenen Auswirkungen auf der Ebene der Fabrikobjekte (Abb. 9) stattfindet. Die Zuverlässigkeit der Change Impact Analyse wird durch die Übereinstimmung des Vergleichs von tatsächlichen Auswirkungen, von abgeschlossenen Umbaumaßnahmen aus der Praxis und den durch die Change Impact Analyse identifizierten Auswirkungen von mehr als 50 Prozent definiert.

Die Validierung und Durchführung einer Falsifizierung basieren auf der Hypothese aus Kapitel 1.4: „Die Auswirkungen von Veränderungen in der Produktion auf Fabrikobjekte des Gebäudes können automatisiert und zuverlässig identifiziert werden.“

Zur Überprüfung der Hypothese wird in den Fallstudien eine Falsifizierung angestrebt. Ist es nicht möglich die Hypothese zu widerlegen, kann die Hypothese aufrechterhalten werden.

Für die Validierung anhand der Fallstudien werden zunächst die Auswahlkriterien sowie das Vorgehen bei den Fallstudien beschrieben. Bei der Auswahl der Fallstudien ist zu gewährleisten, dass es sich um produzierende Unternehmen handelt, bei denen Daten zu abgeschlossenen Fabrikumbauprojekten vorliegen. Nur dann ist es zweckmäßig, einen Vergleich zwischen dem Ergebnis der Change Impact Analyse und den tatsächlich vom Umbau betroffenen Fabrikobjekten anzustellen. Um alle wesentlichen Informationen zu den Auswirkungen von Veränderungen innerhalb von Fabriken erheben zu können, sind Fachexperten für die Befragung und das Ausfüllen des Fragebogens auszuwählen, die einen möglichst vollständigen Überblick über das abgeschlossene Fabrikumbauplanungsprojekt vorweisen können. Dies bezieht sich sowohl auf den Auslöser und den damit einhergehenden geänderten Planungsinformationen der Fabrikumbauplanung als auch auf die betroffenen Fabrikobjekte bzw. Gewerke. Die Datenerhebung, Analyse und Dokumentation der Fallstudien werden nach einem einheitlichen Vorgehen durchgeführt. Zur Datenerhebung werden den befragten Fachexperten Einstiegsfragen zur Häufigkeitsverteilung von Planungsfällen gestellt. Die Ergebnisse finden sich in Anhang H (Abb. H.1, Abb. H.2, Abb. H.3). Anschließend werden die Grundzüge des Modells der Interdependenzen (Abb. 28) erläutert. Dabei werden insbesondere die Wechselwirkungen zwischen den Planungsmodulen thematisiert, um für den konkreten Umbaufall die Auswirkungen auf der Ebene der Fabrikobjekte (Abb. 9) erheben zu können. Anschließend werden die Befragten gebeten, die tatsächlich aufgetretenen Auswirkungen auf die betroffenen Fabrikobjekte im Detail zu benennen. Die Auslöser für die Fabrikumbauplanung und die Auswirkungen auf die Fabrikobjekte werden mit Hilfe eines Fragebogens dokumentiert.

Bei der Analyse der Fallstudien werden zuerst die tatsächlichen Auswirkungen der Fabrikumbauplanung auf die Fabrikobjekte betrachtet. Die Überprüfung der Hypothese erfolgt schließlich durch den Vergleich zwischen den durch die Change Impact Analyse ermittelten Auswirkungen und den tatsächlichen Auswirkungen des Fabrikumbauprojekts aus der Praxis. Eine Falsifizierung liegt vor, wenn die Übereinstimmung der Identifikation weniger als 50 % der tatsächlich betroffenen Fabrikobjekte beträgt.

Abschließende Maßnahme ist die Erstellung einer Dokumentation sowie die Sicherstellung korrekter Interviewergebnisse. Hierzu werden die Ergebnisse der Erhebung der tatsächlichen Auswirkungen des Fabrikumbauplanungsprojektes den Interviewpartnern während der Befragung zur kritischen Durchsicht auf einem digitalen Whiteboard dargestellt. Sofern die interviewten Personen einzelnen Ergebnissen der Dokumentation widersprechen, findet eine Anpassung der Dokumentation statt.

Das beschriebene Vorgehen zur Validierung findet für vier Fallstudien Anwendung, die einen bereits erfolgten Umbauprozess retrospektiv bewerten. Es handelt sich somit um Ex-post-Betrachtungen.

### 6.2.1 Fallstudie 1

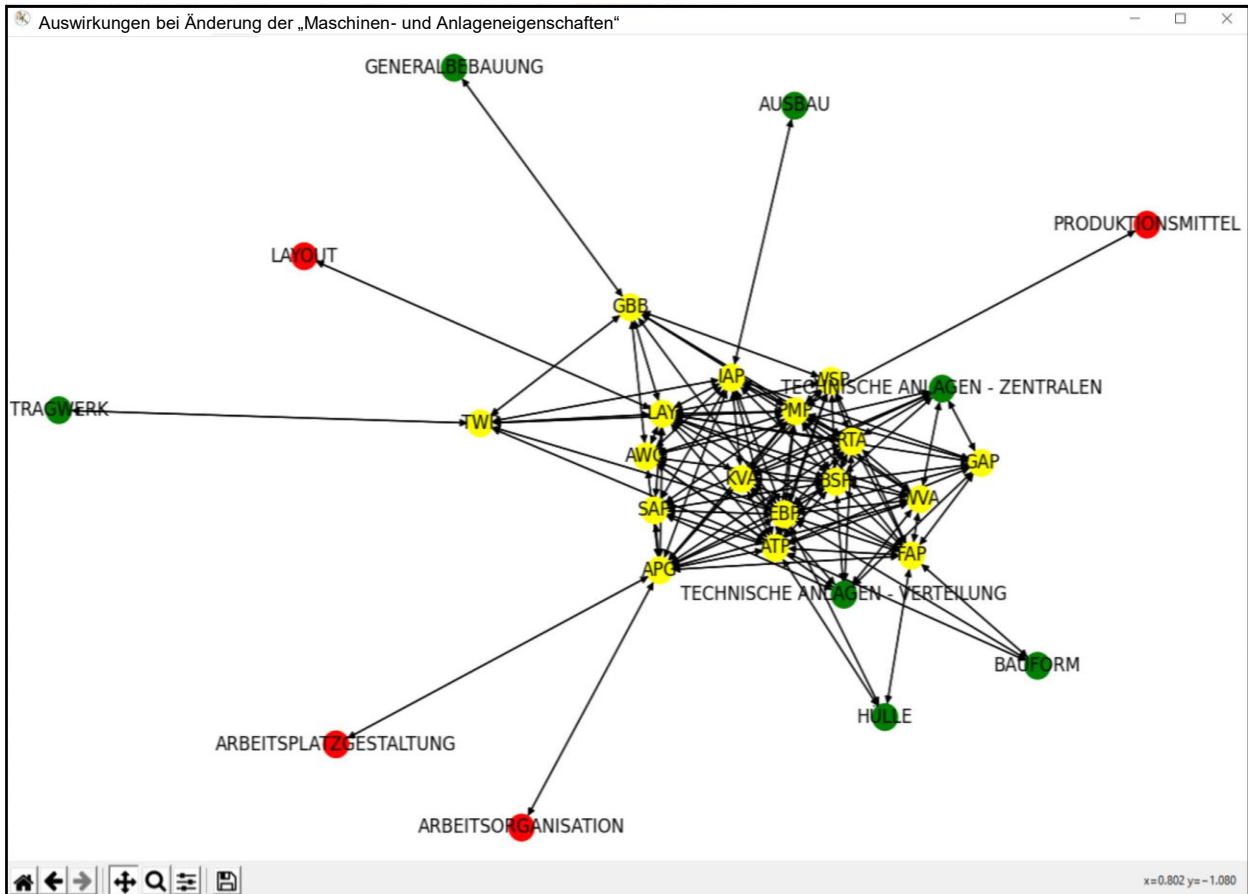
In der ersten Fallstudie war es das Ziel eines produzierenden Unternehmens aus Deutschland, seine Produktionsmittel zu modernisieren. Bei der Einordnung der Fallstudie in die Planungsfälle der Fabrikplanung (Abb. 6) ist diese der Umplanung zuzuordnen und als Anpassung zu bezeichnen. Bei dem Unternehmen handelt es sich um einen Maschinen- und Anlagenbauer für Stromgeneratoren mit bis zu 10 Megawatt (MW). Im Jahr werden ca. 100 Stromgeneratoren als Einzel fertigung hergestellt. Den Auslöser für die Fabrikumbauplanung stellen die neuen Produktionsmittel dar, die zukünftig eingesetzt werden sollen.

Die Ergebnisse der Befragung eines beteiligten Planers zu den tatsächlichen Auswirkungen der umgesetzten Fabrikumbauplanung finden sich in Anhang H (Tab. H.1). In der Produktion sind demnach folgende Fabrikobjekte betroffen, die bei der Fabrikumbauplanung mitberücksichtigt werden müssen: Produktionsmittel, Fabrikstruktur, Arbeitsorganisation, Transportmittel, sonstige Mittel, Produkt und das Layout. Nicht betroffen von der Veränderung der Produktionsmittel sind neben der eingesetzten „Produktionstechnologie“, die gleichbleiben sollte, die „Aufbauorganisation“, das „Produktionskonzept“, das „Logistikkonzept“, das „Qualitätssicherungskonzept“, die „Lagermittel“, die „Informationstechnik“ und die „Arbeitsplatzgestaltung“. Bei den Fabrikobjekten des Industriebaus waren die „Technischen Anlagen“ (Zentralen und Verteilung), der „Innenausbau“ und das „Tragwerk“ betroffen. Alle anderen Fabrikobjekte des Industriebaus (Bauform, Grundstück, Generalbebauung, Außenanlagen, Hülle) waren nicht betroffen (Anhang H, Tab. H.1).

Anschließend werden die tatsächlichen Auswirkungen mit den von der Change Impact Analyse identifizierten Auswirkung verglichen. Aus der Modernisierung der Produktionsmittel resultieren geänderte „Maschinen- und Anlageneigenschaften“. Die von der Change Impact Analyse identifizierten Auswirkungen auf die Fabrikobjekte sind in Abb. 44 abgebildet. Die mit den neuen Produktionsmitteln verbundenen Änderungen hinsichtlich Abmessungen, Massen, unter Last entstehende Emissionen etc. gehen als Planungoutput aus dem Planungsmodul Produktionsmittelplanung als Planungsinput in die in Abb. 44 dargestellten Planungsmodule ein. Neue Produktionsmittel haben in Form des Planungsinputs „Maschinen- und Anlageneigenschaften“, wie in Abb. 44 dargestellt, direkten Einfluss auf die Planungsmodule KVA, EBP, WSP, GAP, WVA, FAP, GBB, TWP, LAY, SAP, PMP, IAP, AWG, APG, ATP, BSP und RTA. Durch die Vernetzung der Planungsmodule (Anhang D) entstehen direkte Auswirkungen auf die Fabrikobjekte „Produktionsmittel“, „Layout“, „Arbeitsplatzgestaltung“ und „Arbeitsorganisation“ (Produktion) sowie auf die „Hülle“, „Bauform“, „Generalbebauung“, das „Tragwerk“, den „Ausbau“, die „Technische Anlagen – Zentralen“ und die „Technischen Anlagen – Verteilung“ (Industriebau), (Abb. 44). Wie bereits in

Kapitel 5.2 erläutert, werden hier ausschließlich die direkten Auswirkungen auf die Planungsmodule und Fabrikobjekte wiedergegeben. Weitere indirekte Auswirkungen sind möglich und müssen im Einzelfall identifiziert sowie überprüft werden. Die von der Change Impact Analyse identifizierten Auswirkungen sind im Anhang H (Tab H.2) dokumentiert.

Der Vergleich zwischen den tatsächlichen Auswirkungen und den identifizierten Auswirkungen der Change Impact Analyse findet sich in Anhang H (Tab H.3). Als Ergebnis der Validierung der Methode 2, der Change Impact Analyse, durch die Fallstudie 1 kann festgehalten werden, dass sich eine Übereinstimmung der tatsächlichen Auswirkungen und identifizierten Auswirkung auf die Fabrikobjekte von 66,67 % (16 von 24 Fabrikobjekten) ergibt. Wird die Übereinstimmung nach Fabrikobjekten der Produktion und des Industriebaus getrennt analysiert, ergibt sich sowohl bei den Fabrikobjekten der Produktion (10 von 15 Fabrikobjekten) als auch bei den Fabrikobjekten des Industriebaus (6 von 9 Fabrikobjekten) eine Übereinstimmung von 66,67 %. Da der Wert der Übereinstimmung über 50 % liegt, wird die Hypothese aufrechterhalten. Eine Falsifizierung der Hypothese erfolgt nach Fallstudie 1 nicht.



- Fabrikobjekte der Produktionssystemplanung
- Fabrikobjekte der Industriebauplanung
- Planungsmodule

- KVA: Planung der Kälteanlagen
- EBP: Energie- und Bauphysikplanung
- WSP: Werksstrukturplanung
- GAP: Gebäudeautomationsplanung
- WVA: Planung der Wärmeversorgung
- FAP: Fassadenplanung

- LAY: Layout
- TWP: Tragwerksplanung
- SAP: Starkstromanlagenplanung
- GBB: Planung der Gründung und Bodenbelastung
- PMP: Produktionsmittelplanung
- IAP: Innenausbauplanung
- AWG: Planung der Wasser-, Abwasser- und Gasanlagen
- APG: Arbeitsplatzgestaltung
- ATP: Architektonische Planung
- BSP: Brandschutzplanung
- RTA: Planung der Raumluftechnischen Anlagen

Abb. 44: Mit der Change Impact Analyse identifizierte Auswirkungen geänderter Maschinen- und Anlageneigenschaften auf die Fabrikobjekte

## 6.2.2 Fallstudie 2

In der zweiten Fallstudie ist es das Ziel eines produzierenden Unternehmens, mit Sitz in Deutschland, seine Fertigungstechnologien zu erweitern. Die Vorfertigung von Stahlträgern, die bisher zugekauft wurden, sollte zukünftig im eigenen Werk stattfinden. An das bestehende Fabrikge-



bäude wurde ein Erweiterungsbau angeschlossen. Bei der Einordnung der Fallstudie in die Planungsfälle der Fabrikplanung (Abb. 6) ist diese der Umplanung zuzuordnen und als Erweiterung zu bezeichnen. Bei dem Unternehmen handelt es sich um ein Fertigteilwerk für den Bau von vorgefertigten Gebäudemodulen. Im Jahr werden ca. 2000 Module in der variantenreichen Serienfertigung hergestellt. Den Auslöser für die Fabrikumbauplanung stellt folglich die Integration einer neuen Fertigungstechnologie dar.

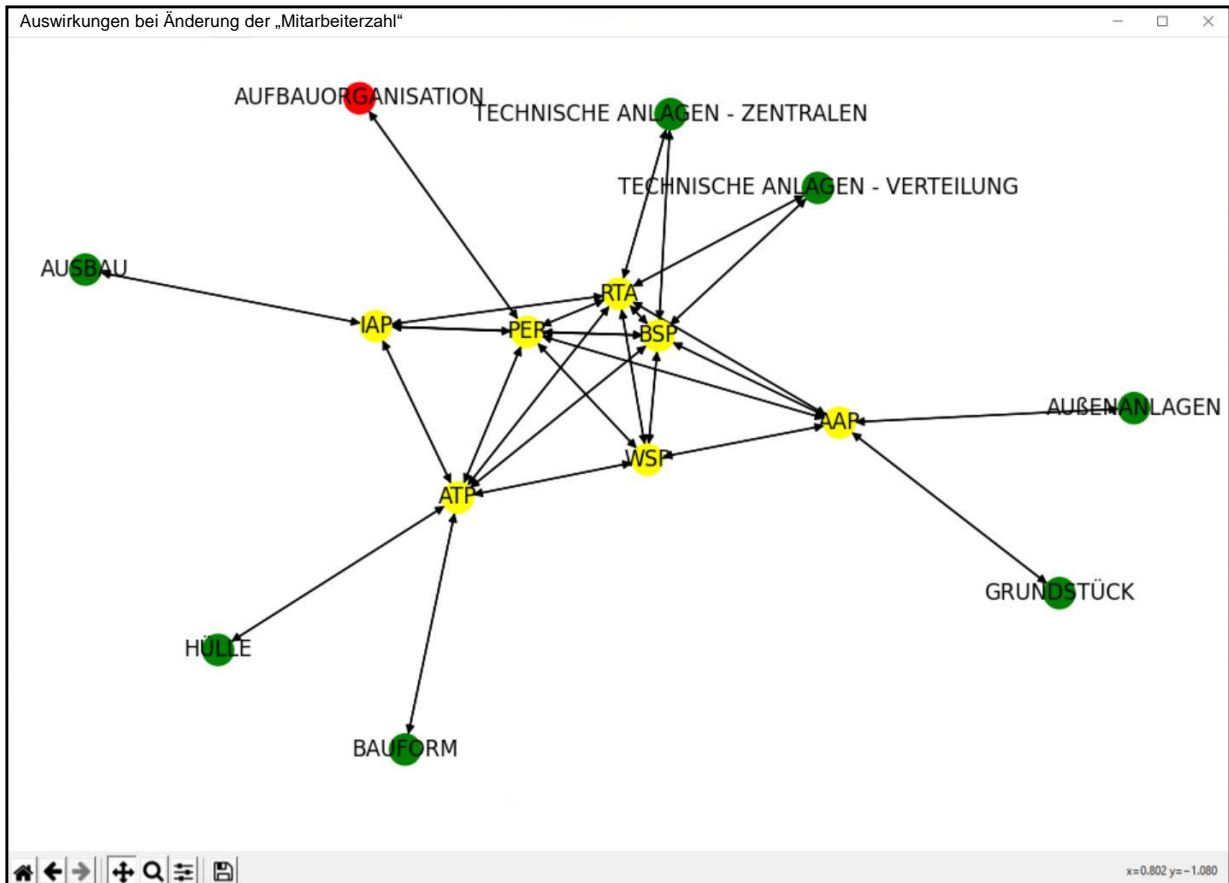
Die Ergebnisse der Befragung eines beteiligten Planers zu den tatsächlichen Auswirkungen dieser umgesetzten Fabrikumbauplanung finden sich im Fragebogen in Anhang H (Tab. H.4).

In der Produktion sind dem Interview zufolge nachstehende Fabrikobjekte betroffen: Produktionstechnologie, Produktionsmittel, Aufbauorganisation, Produktionskonzept, Fabrikstruktur, Logistikkonzept, Arbeitsorganisation, Qualitätssicherungskonzept, Transportmittel, Sonstige Mittel, Informationstechnik, Arbeitsplatzgestaltung und das Layout. Nicht betroffen vom Umbauprozess sind die „Lagermittel“ und das „Produkt“. Bei den Fabrikobjekten des Industriebaus waren bis auf das „Tragwerk“ alle Fabrikobjekte betroffen (Anhang H, Tab. H. 4).

Anschließend werden die tatsächlichen Auswirkungen mit den von der Change Impact Analyse identifizierten Auswirkung verglichen. Aus der Integration der zusätzlichen Fertigungstechnologie resultieren geänderte „Maschinen- und Anlageneigenschaften“ (analog zu Fallstudie 1), eine erhöhte „Mitarbeiterzahl“ und ein veränderter „Ist-Wertstrom“. Die von der Change Impact Analyse identifizierten Auswirkungen auf die Fabrikobjekte sind in Abb. 44, Abb. 45 und Abb. 46 abgebildet. Die mit der neuen Produktionstechnologie verbundenen Änderungen hinsichtlich „Maschinen- und Anlageneigenschaften“, „Mitarbeiterzahl“ und „Ist-Wertstrom“ gehen als Planungsinput in die in Abb. 44, Abb. 45 und Abb. 46 dargestellten Planungsmodule ein.

Durch die Vernetzung der Planungsmodule (Anhang D) entstehen zufolge der Change Impact Analyse direkte Auswirkungen auf die Fabrikobjekte. Die identifizierten Auswirkungen sind im Anhang (Tab H.5) dokumentiert und fassen die Auswirkungen der geänderten „Maschinen- und Anlageneigenschaften“, „Mitarbeiterzahl“ und „Ist-Wertstrom“ zusammen.

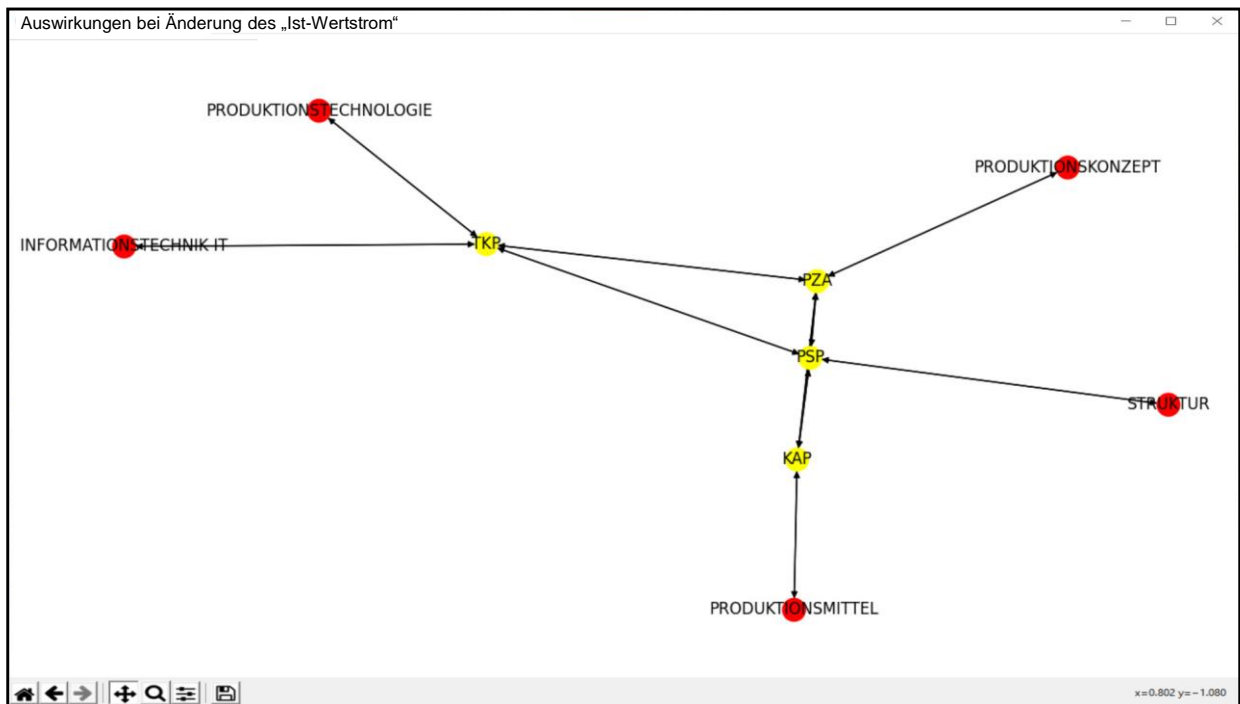
Der Vergleich zwischen den tatsächlichen Auswirkungen und den identifizierten Auswirkungen der Change Impact Analyse findet sich in Anhang H (Tab H.6). Als Ergebnis der Validierung von Methode 2 durch die zweite Fallstudie ergibt sich eine Übereinstimmung der tatsächlichen Auswirkungen und identifizierten Auswirkung auf die Fabrikobjekte von 75,00 % (18 von 24 Fabrikobjekten).



- Fabrikobjekte der Produktionssystemplanung
  - Fabrikobjekte der Industriebauplanung
  - Planungsmodulare
- BSP: Brandschutzplanung
  - IAP: Innenausbauplanung
  - WSP: Werksstrukturplanung
  - AAP: Außenanlagenplanung
  - ATP: Architektonische Planung
  - PER: Personal- und Organisationsplanung
  - RTA: Planung der Raumluftechnischen Anlagen

Abb. 45: Mit der Change Impact Analyse identifizierte Auswirkungen der geänderten Mitarbeiterzahl auf die Fabrikobjekte

Wird die Übereinstimmung nach Fabrikobjekten der Produktion und des Industriebaus getrennt analysiert, ergibt sich bei den Fabrikobjekten der Produktion (11 von 15 Fabrikobjekten) eine Übereinstimmung von 73,33 %. Bei den Fabrikobjekten des Industriebaus (7 von 9 Fabrikobjekten) liegt eine Übereinstimmung von 77,78 % vor. Da der Wert der Übereinstimmung über 50 % liegt, wird die Hypothese weiterhin aufrechterhalten.



- Fabrikobjekte der Produktionssystemplanung
  - Fabrikobjekte der Industriebauplanung
  - Planungsmodule
- PZA: Prozessanalyse
  - KAP: Kapazitätsplanung
  - TKP: Technologiekettenplanung
  - PSP: Produktionsstrukturplanung

Abb. 46: Mit der Change Impact Analyse identifizierte Auswirkungen durch geänderten Ist-Wertstrom auf die Fabrikobjekte

### 6.2.3 Fallstudie 3

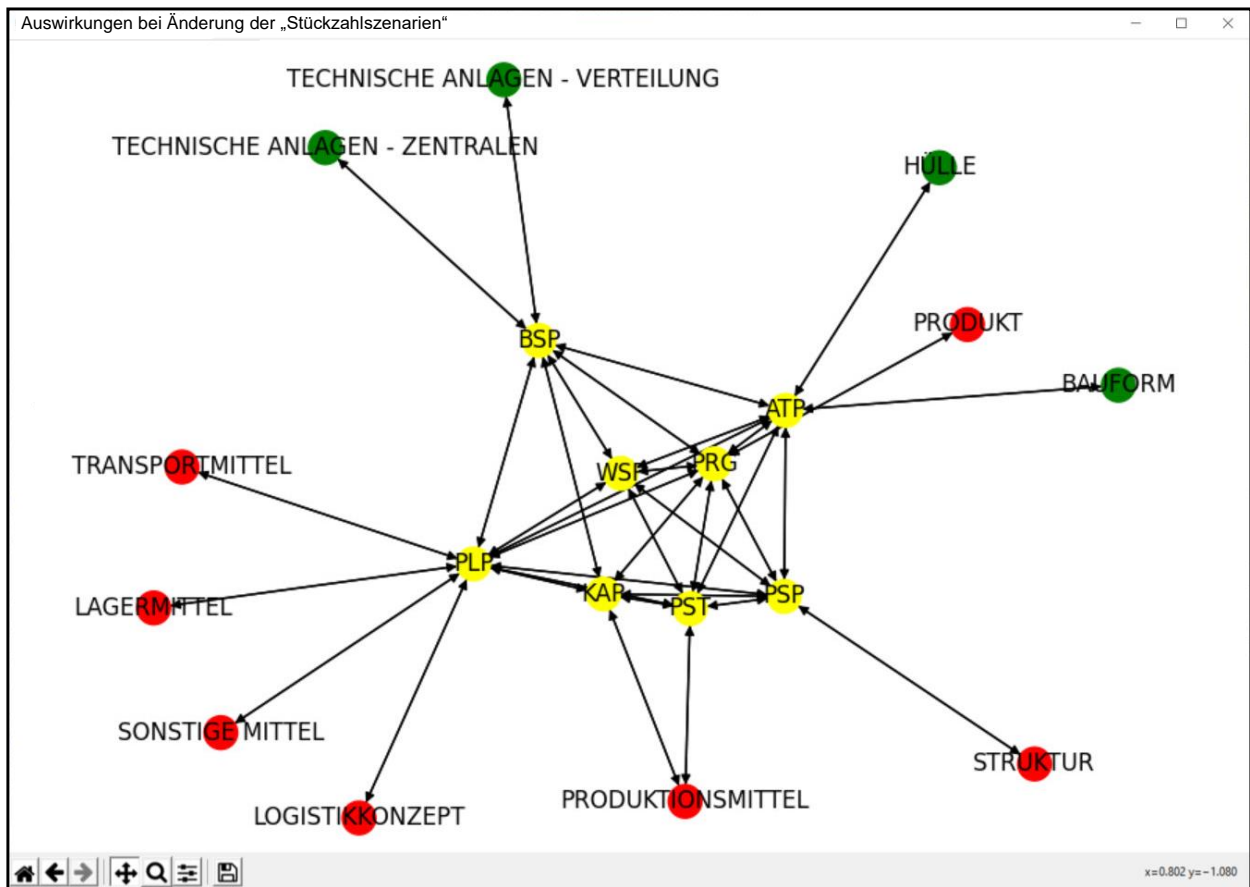
In der dritten Fallstudie wurde bei einem produzierenden Unternehmen aus Deutschland durch zusätzliche Produktionsmittel eine Steigerung der Kapazität beabsichtigt. Das betrachtete Unternehmen stellt Stahlstützen in Vorfertigung für das Baugewerbe her. Die pro Jahr maximal produzierbare Stückzahl an Stahlstützen des Unternehmens steigt somit. Das bestehende Fabrikgebäude wird durch einen Erweiterungsbau ergänzt. Bei der Einordnung der Fallstudie in die Planungsfälle der Fabrikplanung (Abb. 6) ist diese der Umplanung zuzuordnen und als Erweiterung zu bezeichnen. Bei dem Produzenten für Stahlstützen werden jährlich ca. 40.000 Stück in Serienproduktion hergestellt. Den Auslöser für die Fabrikumbauplanung stellt die Erweiterung der Produktionskapazität dar. Die zusätzlichen Produktionsmittel werden zudem dem aktuellen Stand der Technik angepasst.

Die Ergebnisse der Befragung des beteiligten Fabrikplaners zu den tatsächlichen Auswirkungen dieser umgesetzten Fabrikenerweiterung findet sich im Fragebogen in Anhang H (Tab. H.7).

Durch das Interview konnten in der Produktion folgende Fabrikobjekte als betroffen identifiziert werden: Produktionstechnologie, Produktionsmittel, Produktionskonzept, Fabrikstruktur, Logistikkonzept, Lagermittel, Transportmittel, Informationstechnik, Arbeitsplatzgestaltung und das Layout. Nicht betroffen vom Umbauprozess ist die „Aufbauorganisation“, die „Arbeitsorganisation“, das „Qualitätssicherungskonzept“, die „Sonstige Mittel“ und das „Produkt“. Bei den Fabrikobjekten des Industriebaus sind bis auf das „Grundstück“ und die „Außenanlagen“ alle Fabrikobjekte von dem Umbau betroffen.

Die tatsächlichen Auswirkungen können darauffolgend mit den von der Change Impact Analyse identifizierten Auswirkungen verglichen werden. Die Kapazitätserweiterung durch die Integration moderner Produktionsmittel resultiert hinsichtlich der Planungsinformationen in geänderte „Maschinen- und Anlageneigenschaften“ (Analog zu Fallstudie 1) und „Stückzahlenszenarien“. Die mit der Kapazitätserweiterung verbundenen Änderungen hinsichtlich „Maschinen- und Anlageneigenschaften“ und „Stückzahlenszenarien“ gehen als Planungsinput in die in Abb. 44 und Abb. 47 dargestellten Planungsmodule ein.

Die von der Change Impact Analyse identifizierten Auswirkungen sind im Anhang H (Tab H.8) dokumentiert. Der Vergleich zwischen den tatsächlichen Auswirkungen und den identifizierten Auswirkungen der Change Impact Analyse findet sich in Anhang H (Tab H.9).



- Fabrikobjekte der Produktionssystemplanung
- Fabrikobjekte der Industriebauplanung
- Planungsmodule

- KAP: Kapazitätsplanung
- BSP: Brandschutzplanung
- WSP: Werksstrukturplanung
- ATP: Architektonische Planung
- PSP: Produktionsstrukturplanung
- PLP: Produktionslogistikplanung
- PRG: Produktionsprogrammanalyse
- PST: Produktionssteuerungsplanung

Abb. 47: Mit der Change Impact Analyse identifizierte Auswirkungen geänderter Stückzahlsszenarien auf die Fabrikobjekte

Als Ergebnis der Validierung von Fallstudie 3 ergibt sich eine Übereinstimmung der tatsächlichen Auswirkungen und identifizierten Auswirkung auf die Fabrikobjekte von 75,00 % (18 von 24 Fabrikobjekten). Bei getrennt betrachteter Übereinstimmung nach Fabrikobjekten der Produktion und des Industriebaus ergibt sich bei den Fabrikobjekten der Produktion (9 von 15 Fabrikobjekten) eine Übereinstimmung von 60,00 %. Bei den Fabrikobjekten des Industriebaus (9 von 9 Fabrikobjekten) liegt eine Übereinstimmung von 100 % vor. Da der Wert der Übereinstimmung insgesamt über 50 % liegt, wird die Hypothese aufrechterhalten.

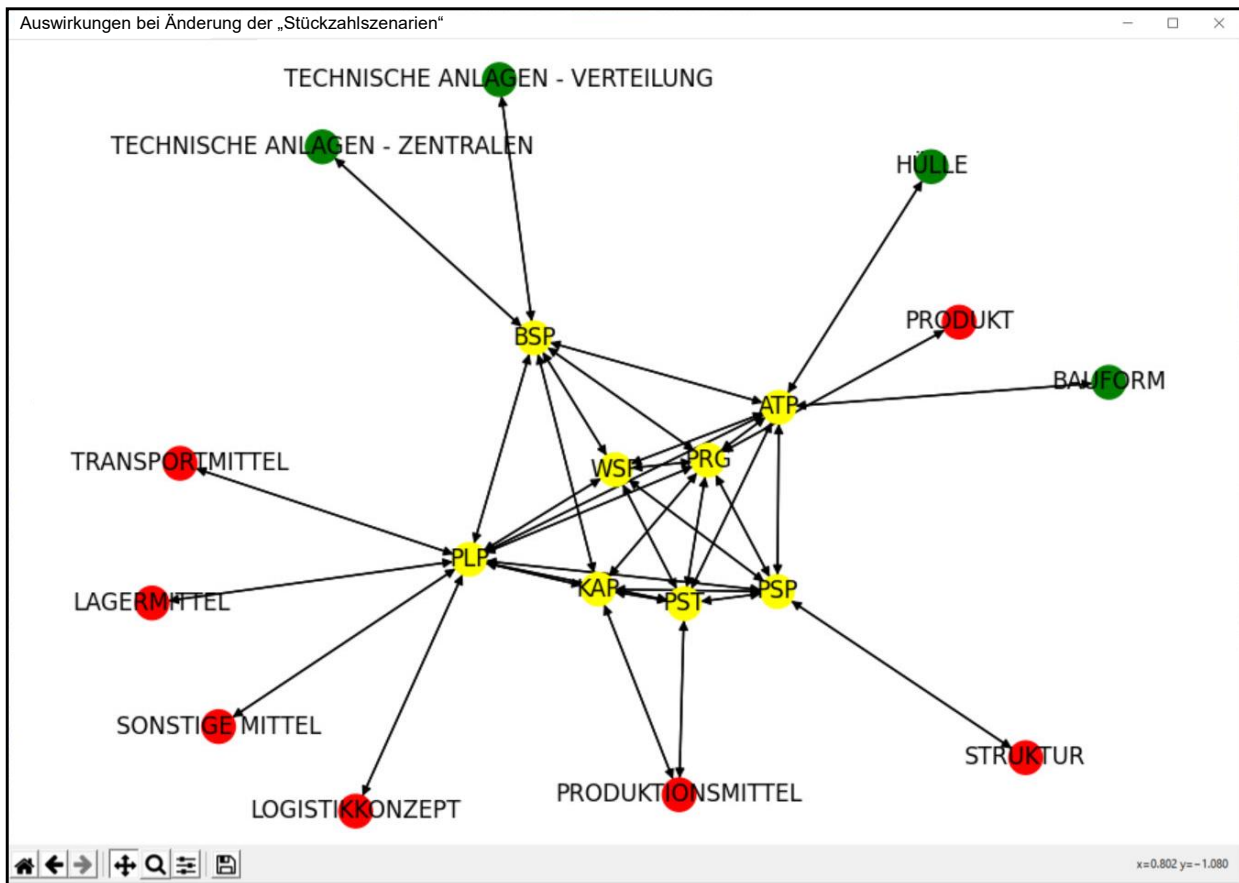
#### 6.2.4 Fallstudie 4

In Fallstudie 4 wird ein Fabrikumbau eines Unternehmens betrachtet, das Maschinen und Anlagen für die Pharmazie, Landwirtschaft und zur militärischen Nutzung herstellt. Aufgrund gesetzlicher Anforderungen wird die Produktion von Maschinen und Anlagen, die teilweise militärisch genutzt werden, nach Deutschland ins Werk verlagert. Bisher wurden die für die Maschinen und Anlagen benötigten Bauteile teilweise im Ausland gefertigt. Um die zusätzlichen Bauteile in Deutschland zu fertigen, wird das Produktionsprogramm angepasst. Das bestehende Fabrikgebäude und das Produktionssystem werden an das neue Produktionsprogramm angepasst. Bei der Einordnung der Fallstudie in die Planungsfälle der Fabrikplanung (Abb. 6) ist diese der Umplanung zuzuordnen und als Anpassung einzustufen. Die jährliche Stückzahl beläuft sich auf ca. 500 Stück. Die Maschinen und Anlagen werden in Kundeneinzelfertigung hergestellt. Den Auslöser für die Fabrikumbauplanung stellt die Kapazitäts- und Produktionsprogrammerweiterung dar. Die Ergebnisse der Befragung des beteiligten Fabrikplaners zu den tatsächlichen Auswirkungen dieser umgesetzten Fabrikanpassung findet sich im Fragebogen in Anhang H (Tab. H.10).

Aus dem Fragebogen, ausgefüllt vom Fabrikplanungsexperten des Projektes, geht hervor, dass folgende Fabrikobjekte der Produktion in Fallstudie 4 tatsächlich vom Umbau betroffen sind: Produktionsmittel, Produktionskonzept, Fabrikstruktur, Qualitätssicherungskonzept, Sonstige Mittel, Informationstechnik, Produkt, Arbeitsplatzgestaltung und das Layout. Nicht betroffen vom Umbau sind im Rahmen der Fabrikobjekte der Produktion die „Produktionstechnologie“, die „Aufbauorganisation“, das „Logistikkonzept“, die „Arbeitsorganisation“, die „Lagermittel“ und die „Transportmittel“. Bei den Fabrikobjekten des Industriebaus ist nur das Fabrikobjekt „Technische Anlagen – Verteilung“ betroffen.

Die tatsächlichen Auswirkungen können darauffolgend mit den von der Change Impact Analyse identifizierten Auswirkungen verglichen werden. Die Eingliederung der Produktion zusätzlicher Bauteile in die Fabrik resultiert hinsichtlich der Planungsinformationen in geänderte „Stückzahlenszenarien“ (Abb. 48) und in ein geändertes „Produktionsprogramm“ (Abb. 49).

Die von der Change Impact Analyse identifizierten Auswirkungen sind im Anhang H (Tab H.11) dokumentiert. Der Vergleich zwischen den tatsächlichen Auswirkungen und den identifizierten Auswirkungen der Change Impact Analyse findet sich in Anhang H (Tab H.12).

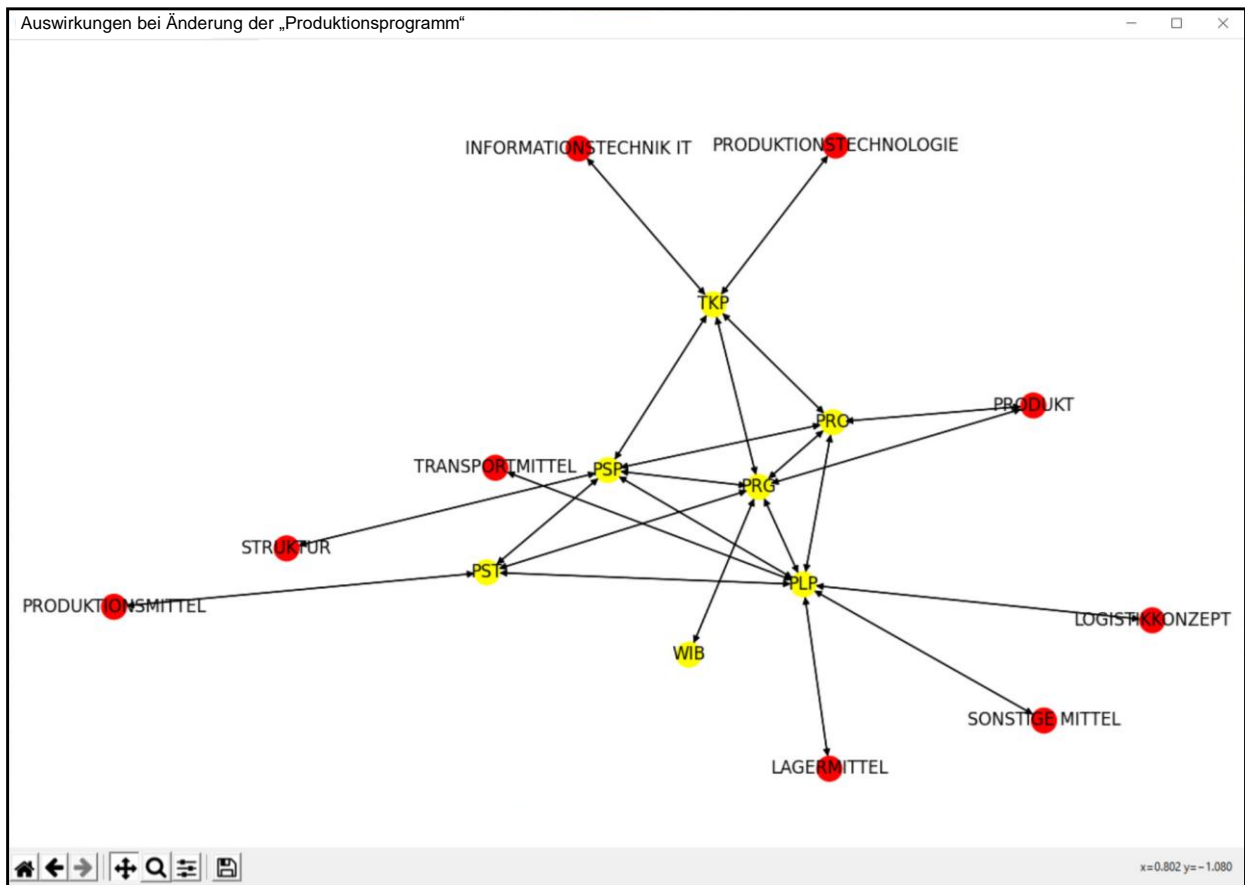


- Fabrikobjekte der Produktionssystemplanung
- Fabrikobjekte der Industriebauplanung
- Planungsmodule

- KAP: Kapazitätsplanung
- BSP: Brandschutzplanung
- WSP: Werksstrukturplanung
- ATP: Architektonische Planung
- PSP: Produktionsstrukturplanung
- PLP: Produktionslogistikplanung
- PRG: Produktionsprogrammanalyse
- PST: Produktionssteuerungsplanung

Abb. 48: Mit der Change Impact Analyse identifizierte Auswirkungen der geänderten Stückzahlsszenarien auf die Fabrikobjekte

Als Ergebnis der Validierung von Fallstudie 4 ergibt sich eine Übereinstimmung der tatsächlichen Auswirkungen und identifizierten Auswirkung auf die Fabrikobjekte von 54,67 % (13 von 24 Fabrikobjekten). Bei getrennt betrachteter Übereinstimmung nach Fabrikobjekten der Produktionssystemplanung und der Industriebauplanung ergibt sich bei den Fabrikobjekten der Produktion (7 von 15 Fabrikobjekten) eine Übereinstimmung von 46,67 %. Bei den Fabrikobjekten des Industriebaus (6 von 9 Fabrikobjekten) liegt eine Übereinstimmung von 66,67 % vor. Da der Wert der Übereinstimmung insgesamt über 50 % liegt, wird die Hypothese weiterhin aufrechterhalten. Eine Falsifizierung der Hypothese erfolgt nicht.



- Fabrikobjekte der Produktionssystemplanung
- Fabrikobjekte der Industriebauplanung
- Planungsmodule

- PRO: Produktanalyse
- PLP: Produktionslogistikplanung
- TKP: Technologiekettenplanung
- PRG: Produktionsprogrammplanung
- PSP: Produktionsstrukturplanung
- PST: Produktionssteuerungsplanung
- WIB: Wirtschaftlichkeitsberechnung

Abb. 49: Mit der Change Impact Analyse identifizierte Auswirkungen eines geänderten Produktionsprogrammes auf die Fabrikobjekte

### 6.3 Verifikation Methode 3

Für Methode 3 (Informationsanforderungserhebung) erfolgt eine formale Verifikation, mit dem Ziel, zu überprüfen, ob die gestellten Anforderungen erfüllt werden und die Erhebungstechnik frei von Widersprüchen ist.

Folgende Anforderungen ergeben sich aus der Defizitbetrachtung (Kapitel 3.3 und 3.5) und den abgeleiteten Anforderungen (Kapitel 4.1 und 5.3) an Methode 3:



- A.1 Hilfestellung bei der Anforderungserhebung leisten, um einheitliche und vollständige Informationsanforderungen zu erhalten.
- A.2 Die Informationsanforderungserhebung muss für Beteiligte aus der Produktions- und Industriebauplanung geeignet sein.
- A.3 Spezifische Informationsanforderungen bzgl. LOD, Attribut-, Kosten-, Termin- und Vertragsinformationen müssen in der Erhebung berücksichtigt werden.
- A.4 Die Informationsanforderungen müssen expliziten BIM-Objekten und BIM-Elementen zugeordnet werden können.
- A.5 Die Dokumentation von Informationsanforderungen soll systematisch erfolgen.

Um die Anforderungen zu überprüfen, wird ein theoretisches Fallbeispiel durchgeführt, in dem eine Integration von neuen Produktionsmitteln geplant wird. Wie in Kapitel 5.3 beschrieben, wird für die Erhebung der Informationsanforderungen an das für den Umbaufall benötigte digitale Fabrikgebäudemodell eine Anforderungsschablone (Abb. 31) verwendet. Durch die Verwendung der Anforderungsschablone wird den Beteiligten der Fabrikumbauplanung eine Hilfestellung bei der Formulierung von einheitlichen und vollständigen Informationsanforderungen bereitgestellt. Anforderung A.1 wird somit erfüllt. Die Anforderungsschablone ist sowohl für Informationsanforderungen aus der Produktionssystemplanung als auch aus der Industriebauplanung geeignet, da die Anforderungsschablone uneingeschränkt von allen Planern für die Formulierung von Informationsanforderungen genutzt werden kann. Dadurch wird Anforderung A.2 ebenfalls als erfüllt angesehen.

Für das Fallbeispiel sind in Anhang I in der Informationsanforderungsliste (Tab. I.1) 19 Informationsanforderungen von möglichen, am Umbau beteiligten Planern aufgelistet, die in den Ausschnitt der LOD-Zuordnungsmatrix (Abb. 50) eingetragen sind. Es ergibt sich durch die abgefragten und dokumentierten Informationsanforderungen ein für die Umplanung notwendiges LOD von 300 (Anhang I: Tab. I.1). Außerdem beschränken sich die Informationsanforderungsbedarfe auf geometrische und attributive Informationen. Informationen zu Kosten, Verträgen und Terminplänen werden für die erste Planung zur Integration neuer Produktionsmittel nicht benötigt und daher in Abb. 50 nicht aufgeführt. Die LOD-Zuordnungsmatrix kommt demzufolge der Anforderung A.3 nach, Informationsanforderungen bzgl. LOD, Attribut-, Kosten, Termin- und Vertragsinformationen zu berücksichtigen.

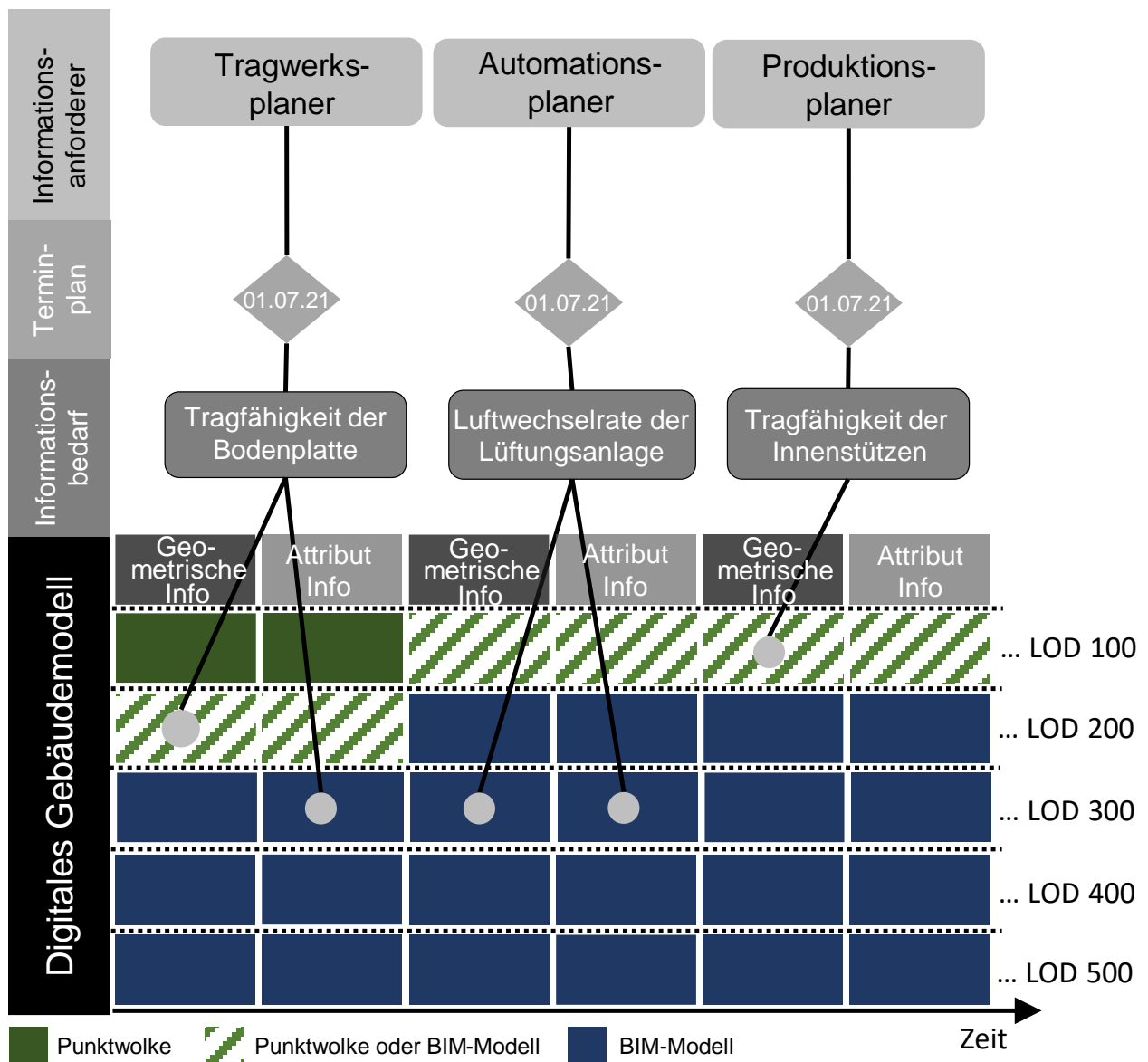


Abb. 50: LOD-Zuordnungsmatrix

Die Informationsanforderer bzw. die am Umbau beteiligten Fachplaner beziehen ihre Informationsanforderung gemäß dem Aufbau der Informationsanforderungsliste auf die von den Kosten-  
gruppen der [DIN 276 2018] angelehnten Bauteile bzw. Modellelemente einer Fabrik (Anhang I:  
Tab. I.1). Die Zuordnung der Informationsanforderung „Tragfähigkeit“ zu dem BIM-Objekt „Bo-  
denplatte“ aus dem Fallbeispiel findet unter Verwendung der LOD-Zuordnungsmatrix im Anhang  
I (Abb. I.1) statt. Der Anforderung A.4 wird entsprochen, da die entwickelte Zuordnungsmatrix es  
erlaubt, Informationsanforderungen strukturiert den BIM-Objekten zuzuordnen.

Die notwendigen Informationen werden durch die in der Spezifikation für die Lieferung von digi-  
talen Modellinhalten enthaltenen Tabelle „Informationsanforderungsliste“ (Tab. I.1) dokumentiert.  
Die systematische Erhebung von Informationsanforderungen (A.5) sowie die Verifikation der Hy-  
pothese (Kapitel 1.4) kann somit als erfüllt angesehen werden.

## 6.4 Validierung Methode 4

Zur Validierung von Methode 4 wird das entwickelte AR-Softwarewerkzeug anhand einer Fallstudie geprüft. Gemäß des Anwendungsbereiches des AR-Softwarewerkzeugs auf dem Gebiet der visuellen Darstellung der digitalen Fabrikgebäudemodelle vor Ort werden 13 Wiedergabedimensionen in Anlehnung an [Reinemann 2021, S. 144] untersucht (Anhang J, Tab. J.1):

Proportionen, räumliche Dimensionen, räumliche Orientierung, räumliche Positionierung, Farbwirkung, Lichtwirkung, Form, Konstruktionstiefe, Wirkbeziehungen, Funktionsumfang, Funktionstiefe, Eingabeverhalten und Ausgabeverhalten.

Übergeordnet sind die Wiedergabedimensionen der visuellen Erscheinung, der Funktionalität und der Interaktivität zuzuordnen (Anhang J, Tab. J.1). Die zu analysierenden Dimensionen der Wiedergabetreue liefern Erkenntnisse über die visuelle und informative Unterstützung der Anwender (Fabrikplaner).

Um während der Validierung auch eine Falsifizierung durchzuführen, wird die Hypothese aus Kapitel 1.4 „Aktuelle digitale Fabrikgebäudemodelle können vor Ort zur Unterstützung der Fabrikumbauplanung zur Verfügung gestellt werden und liefern eine Unterstützung bei der räumlichen Einschätzung von Umbaumaßnahmen“ überprüft. Gemäß der Überprüfung ihrer Validität ist die Hypothese zur Unterstützung bei der räumlichen Einschätzung von Umbaumaßnahmen durch das Anstreben einer Falsifizierung zu testen. Sofern die Falsifizierung nicht gelingt, kann die Hypothese aufrechterhalten werden. Ansonsten wird die Hypothese verworfen. Die Überprüfung der Hypothese erfolgt durch den Vergleich zwischen einem in der Praxis eingesetzten Werkzeug zur Darstellung von Umplanungsmaßnahmen und dem vorgeschlagenen AR-Softwarewerkzeug. Eine Falsifizierung liegt vor, wenn die bisher eingesetzten Hilfsmittel besser bewertet werden als das entwickelte AR-Softwarewerkzeug.

In der Fallstudie wird die Planung der wechselnden Flächenbelegung des Shopfloors in der Forschungsfabrik Arena2036 untersucht und durch das AR-Softwarewerkzeug unterstützt. Veränderungen der Bereiche, in denen Forschungsaufbauten für Forschungsprojekte geplant werden sind Gegenstand der Untersuchung. Exemplarisch wird eine Fläche, die neu belegt werden soll anhand der bisher eingesetzten Lösung (2D PowerPoint Grundrissplan) und dem AR-Softwarewerkzeug geplant und dargestellt. Die Bewertung der Lösungen erfolgt durch das Team der Arena2036, welches für die Flächenbelegungen und Umplanungen zuständig ist.

Das AR-Softwarewerkzeug wird hinsichtlich der im Fragebogen aufgelisteten Wiedergabedimensionen in den Bereichen Erscheinung (visuell), Funktionalität und Interaktivität bewertet (Anhang J: Tab. J.1). Als Referenz dient die Darstellung des Umbauvorhabens via 2D CAD/ PowerPoint Grundrissplan.

Die Bewertung der Wiedergabetreue in den Wiedergabedimensionen erfolgt für den geplanten Aufbau eines Forschungsdemonstrators auf einer Ordinalskala von 1 bis 5. Die Bewertung von 5 korrespondiert mit einer vollständigen Ausgestaltung der Wiedergabetreue in der betreffenden Wiedergabedimension. Ein Wert von 1 stellt eine fehlende Ausgestaltung dar. Zum Fragebogen, der zur Bewertung und dem Vergleich der beiden Lösungen dient, wird den Befragten eine Erläuterung der Wiedergabedimensionen vorgelegt (Anhang J, Tab. J.1).

Die Bewertungsergebnisse der zwei miteinander verglichenen Darstellungsmethoden zur Umplanung sind in Abb. 51 aufgelistet. Abgebildet sind für jede bewertete Wiedergabedimension der Median der Wiedergabetreue aus der Befragung des Planungsteams der Arena2036. Die einzelnen ausgefüllten Bewertungsbögen finden sich im Anhang J (Abb. J.1, Abb. J.2). Insgesamt bewerteten die befragten Planer die Wiedergabetreue des AR-Softwarewerkzeugs in allen Wiedergabedimensionen im Vergleich zum 2D PowerPoint Grundrissplan als besser ausgestaltet (Abb. 51).

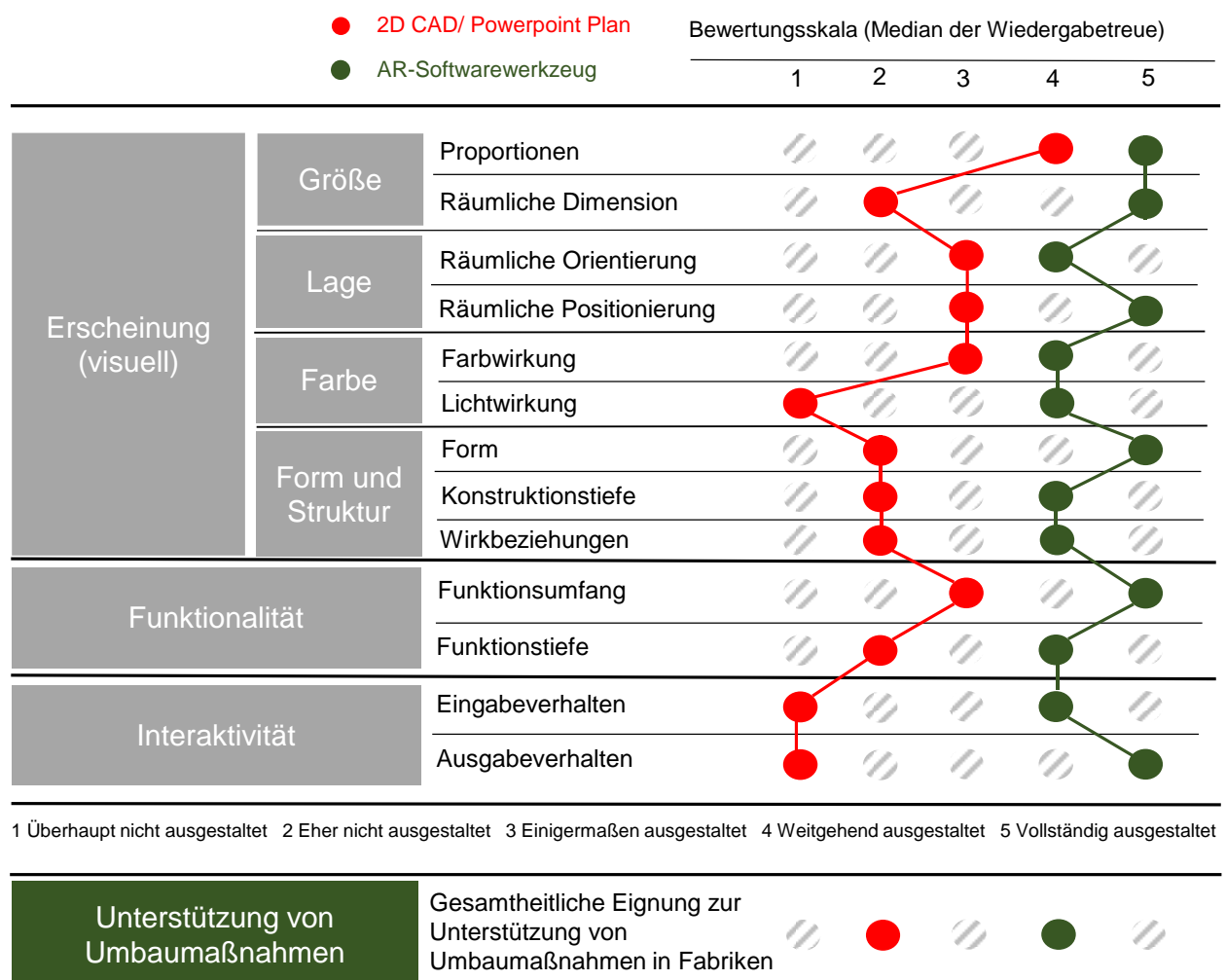


Abb. 51: Ergebnisse der Bewertung der Wiedergabedimensionen des 2D PowerPoint Plans und des 3D AR-Softwarewerkzeugs

Die Bewertung (Abb. 51) lässt auf die Eignung des AR-Softwarewerkzeugs zur Darstellung von Umplanungen innerhalb von Fabriken schließen. Besonderes Potenzial weist das AR-Softwarewerkzeug in jenen Wiedergabedimensionen auf, welche sich auf die räumliche Darstellung des digitalen Fabrikgebäudemodells beziehen: Räumliche Dimensionen, Räumliche Positionierung und Form. Dieses Potenzial lässt sich darauf zurückführen, dass der Anwender durch das AR-Softwarewerkzeug vor Ort in die Lage versetzt wird, das digitale Fabrikgebäudemodell im direkten Zusammenhang der realen Umbauumgebung darzustellen. Es zeigt sich, dass der Anwender bei der Beurteilung der Proportionen des umgebauten Shopfloorbereichs sowie dessen Orientierung im Raum unterstützt wird. Neben der visuellen Erscheinung wird das AR-Softwarewerkzeug ebenfalls in der Funktionalität und Interaktivität deutlich besser bewertet als der 2D Grundrissplan (Abb. 51). Dies ist auf die Möglichkeiten der Interaktion und den vom AR-Softwarewerkzeug zur Verfügung gestellten Funktionen zurückzuführen, die es im Gegensatz zum bisher eingesetzten 2D Grundrissplan ermöglichen, zusätzliche Informationen nach Bedarf einzublenden.

Bei den Nutzertests wird jedoch auch deutlich, dass oftmals zusätzliche Informationen spontan erwünscht sind, die während der Erstellung der Anwendung nicht berücksichtigt wurden und somit fehlen. Eine ad hoc Anpassung des AR-Softwarewerkzeugs während der Nutzung ist bisher nicht möglich, sondern setzt Anpassungen in der Entwicklungsumgebung Unity voraus, was eine Neuinstallation der Anwendung auf dem mobilen Endgerät verlangt. Durch die durchweg höhere Bewertung der Wiedergabetreue aller Wiedergabedimensionen (Abb. 51) des AR-Softwarewerkzeugs im Vergleich zu den 2D PowerPoint Grundrissplänen kann die gestellte Hypothese für Methode 4 aufrechterhalten werden. Eine Falsifizierung der Hypothese erfolgt nicht.

## 6.5 Kritische Reflexion der Verifikation und Validierung

In der vorliegenden Arbeit sollte Anhand der Entwicklung der Methodik die Unterstützung der Fabrikumbauplanung mit Fokus auf Fabrikgebäude erreicht werden (vgl. Zielstellung in Kapitel 1.3).

Zusammenfassend kann mit Bezug auf die **FF 1 „Welches strukturierte Vorgehen eignet sich, um ein digitales Fabrikgebäudemodell aktuell zu halten?“** festgestellt werden, dass nicht nur die Ergebnisse des Verfahrensvergleichs aus Kapitel 6.1.1 auf einen erfolgreichen Einsatz in der Praxis hinweisen. Auch die Befragung von Experten aus einem Unternehmen, das bereits Aktualisierungen von digitalen Fabrikgebäudemodellen durchführt, bestätigt, dass die vorgeschlagene Aktualisierungsmethode für die Praxis zweckmäßig ist. Als Anforderungen an den Aktualisierungsprozess (Methode 1) wurde eine kurze Aufnahmedauer vor Ort, der Einsatz kostengünstiger Hardware und das Erreichen einer hohen Genauigkeit der entstehenden Punktwolke gestellt.

Dass die Anforderungen erfüllt werden, konnte in einer Fallstudie (Kapitel 6.1.1) aufgezeigt werden. Die Aufnahmedauer vor Ort kann mit 08:30 Min im Vergleich zum terrestrischen Laserscanner mit 13:55 Min als niedrig eingestuft werden (Tab. 4). Obgleich die Aufnahme mit dem Handscanner mit ca. 5 Min nochmals niedriger liegt, wird dieser wegen der hohen Gerätekosten in der Praxis oftmals nicht eingesetzt. Die Kosten der eingesetzten Geräte des vorgeschlagenen, auf Photogrammetrie basierenden Aktualisierungsverfahrens, liegen deutlich unter denen der in der Praxis häufig eingesetzten Laserscannern (Tab. 6). Die Genauigkeit, die mit dem vorgeschlagenen Aktualisierungsprozess für Punktwolken erreicht wird, ist im Vergleich zur Aktualisierung mit Laserscannern ebenfalls als hoch (Kapitel 6.1.1) einzustufen. Die Aktualisierungsmethode leistet durch die Bereitstellung von aktuellen digitalen Fabrikgebäudemodellen in der Phase der Informationsbeschaffung (Abb. 21) einen erkennbaren Beitrag zur Unterstützung der Fabrikumbauplanung. In der vorliegenden Arbeit konnte aufgezeigt werden, dass nicht zuletzt in der Fabrikumbauplanung einfache, auf der klassischen Mehrbildphotogrammetrie basierende Aufnahmeverfahren für die Erfassung kleinteiliger bauteilbezogener Änderungen geeignet ist. Durch das Vorhalten und Bereitstellung von aktuellen digitalen Fabrikgebäudedaten können, die in der Praxis etablierten, ad hoc Erfassungen (Anhang A: Tab. A.3) vor Fabrikumbauplanungen eliminiert und dadurch Zeit eingespart werden. Als Nachteil der vorgeschlagenen Aktualisierungsmethode ist die Nachbearbeitungszeit zu nennen. Die Nachbearbeitungszeit zur Erstellung der photogrammetrischen Punktwolken ist im Vergleich zu der Nachbearbeitungszeit bei den Punktwolken der Laserscanner noch um ein Vielfaches höher (Tab. 5). Die Nachbearbeitungszeit der Photogrammetrie wird sich erst in Zukunft durch eine deutliche Steigerung der Rechenkapazitäten von Prozessoren und Grafikkarten den Nachbearbeitungszeiten von Punktwolken, generiert durch Laserscanner, annähern. Zudem ist je nach Anwendungsfall und Ausmaß der baulichen Veränderung weiterhin abzuwägen, welches Aufnahmeverfahren (Photogrammetrie oder Laserscan) für den jeweiligen Anwendungsfall geeigneter ist. Jedes Aktualisierungsvorgehen (Photogrammetrie und Laserscan) weist Vor- und Nachteile auf (vgl. Kapitel 6.1). Der Einsatz der Photogrammetrie zur Aktualisierung von digitalen Fabrikgebäudemodellen in der Disziplin der Fabrikplanung, insbesondere unter Verwendung von Smartphones, bildet den Neuigkeitswert der vorliegenden Arbeit. Da es die entwickelte Aktualisierungsmethode ermöglicht, digitale Fabrikgebäudemodelle in Form von Punktwolken photogrammetrisch mit kostengünstiger Hardware, einer kurzen Aufnahmedauer vor Ort (Aufnahmedauer in der Fallstudie: 08:30 min) zu aktualisieren, werden alle Anforderungen als vollständig erfüllt bewertet (Abb. 55).

Mit Bezug auf die FF 1 (Kapitel 1.3) und den gestellten Anforderungen (Kapitel 4.1) kann konstatiert werden, dass das entwickelte Aktualisierungsverfahren via Photogrammetrie sich eignet, um ein digitales Fabrikgebäudemodell während der Betriebsphase, in der eine Vielzahl kleinteiliger Veränderungen stattfinden, aktuell zu halten (Abb. 52). Die Validierung der Aktualisierungsmethode im Rahmen der Fallstudie (Kapitel 6.1.1) und durch die Bewertung der Praxistauglichkeit

(Kapitel 6.1.2) durch Fachexperten hat nicht zu einer Falsifizierung der aufgestellten Hypothese geführt. Die Hypothese aus Kapitel 1.4 kann daher aufrechterhalten werden und die entwickelte Aktualisierungsmethode wird für die Praxis als relevant eingestuft.

Zur Beantwortung der **FF 2 „Wie können bei einem Fabrikumbau die Auswirkungen auf das Fabrikgebäude identifiziert werden?“** wurden für die Analyse der Wirkbeziehungen bei Umbauplanungen die Fabrikobjekte und deren Verknüpfung durch Planungsmodule herangezogen. Die Entwicklung der Methode berücksichtigt die gestellten Anforderungen (Kapitel 4.1) einer schnellen, aufwandsarmen und zuverlässigen Identifikation von Änderungsauswirkungen, welche die Elemente des Fabrikgebäudes einbezieht. Das abgeleitete Modell der Interdependenzen (Abb. 28) wird durch die Entwicklung eines Softwarewerkzeugs operationalisiert und unterstützt die Identifikation von Auswirkungen (Change Impact Analyse) innerhalb des bestehenden Wirkungsnetzwerkes der Fabrik. Der Einsatz des Softwarewerkzeugs ermöglicht durch die Eingabe von veränderten Planungsinformationen eine automatisierte Identifikation der Auswirkungen auf die Fabrikobjekte des Fabrikgebäudes und erreicht dabei eine hohe Zuverlässigkeit (Kapitel 6.2). In den vier Fallstudien konnte nachgewiesen werden, dass die Nutzung des Softwarewerkzeugs zur Durchführung der Change Impact Analyse automatisiert und dadurch schnell die Auswirkungen von geänderten Planungsinformationen darstellt. Außerdem weisen diese auch eine hohe Übereinstimmung mit den tatsächlichen Auswirkungen (basierend auf abgeschlossenen Fabrikumbauprojekten aus der Praxis) auf (Kapitel 6.2). Dennoch liefert das Softwarewerkzeug keine Übereinstimmungswerte von 90 % oder höher. Dies deutet darauf hin, dass das statische Modell der Interdependenzen, auf dem das Softwarewerkzeug basiert weiter angepasst und optimiert werden muss. Zudem sind die Ergebnisse von den Beteiligten der Fabrikumbauplanung immer kritisch zu hinterfragen und zu überprüfen. Die Validierung der Change Impact Analyse (Methode 2) im Rahmen von Fallstudien hat nicht zu einer Falsifizierung der aufgestellten Hypothese (Kapitel 1.4) geführt. Die Hypothese kann daher nach Analyse aller Fallstudien aufrechterhalten werden. Als Schlussfolgerung können mit der entwickelten Change Impact Analyse Auswirkungen von Veränderungen in der Produktion auf das Fabrikgebäude automatisiert und im Rahmen der definierten Zuverlässigkeit (Übereinstimmung von tatsächlichen und identifizierten Auswirkungen > 50 %) identifiziert werden. Analoge Vorgehensweisen, wie der Austausch von Fachplanern, sowie der Einsatz der in der Literatur vorgeschlagenen Design Structure-Matrizen, die zur Analyse von hochvernetzten Systemen dienen, liefern im Gegensatz zur Change Impact Analyse keine Ergebnisse innerhalb von Sekunden. Die Verwendung des Softwarewerkzeugs zur automatisierten Identifikation von Änderungsauswirkungen leistet somit in der Phase der Informationsauswertung (Abb. 21) einen Beitrag zur Verkürzung der Planungsdauer. Zudem unterstützt

die Change Impact Analyse durch Zugreifen auf das in den Wirkbeziehungen gespeicherten Wissen die beteiligten Planer einer Fabrikumbauplanung bei der Identifikation von Änderungsauswirkungen, wie es ansonsten nur durch jahrelange Planungserfahrung möglich wäre.

Die Anforderung der schnellen, aufwandsarmen und zuverlässigen Identifikation von Änderungsauswirkungen, welche die Methode leisten sollte, kann durch den Einsatz des Softwarewerkzeuges überwiegend erfüllt werden (Abb. 52). Die Ergebnisse der Fallstudien zeigen jedoch auch, dass die Zuverlässigkeit noch weiter gesteigert werden kann.

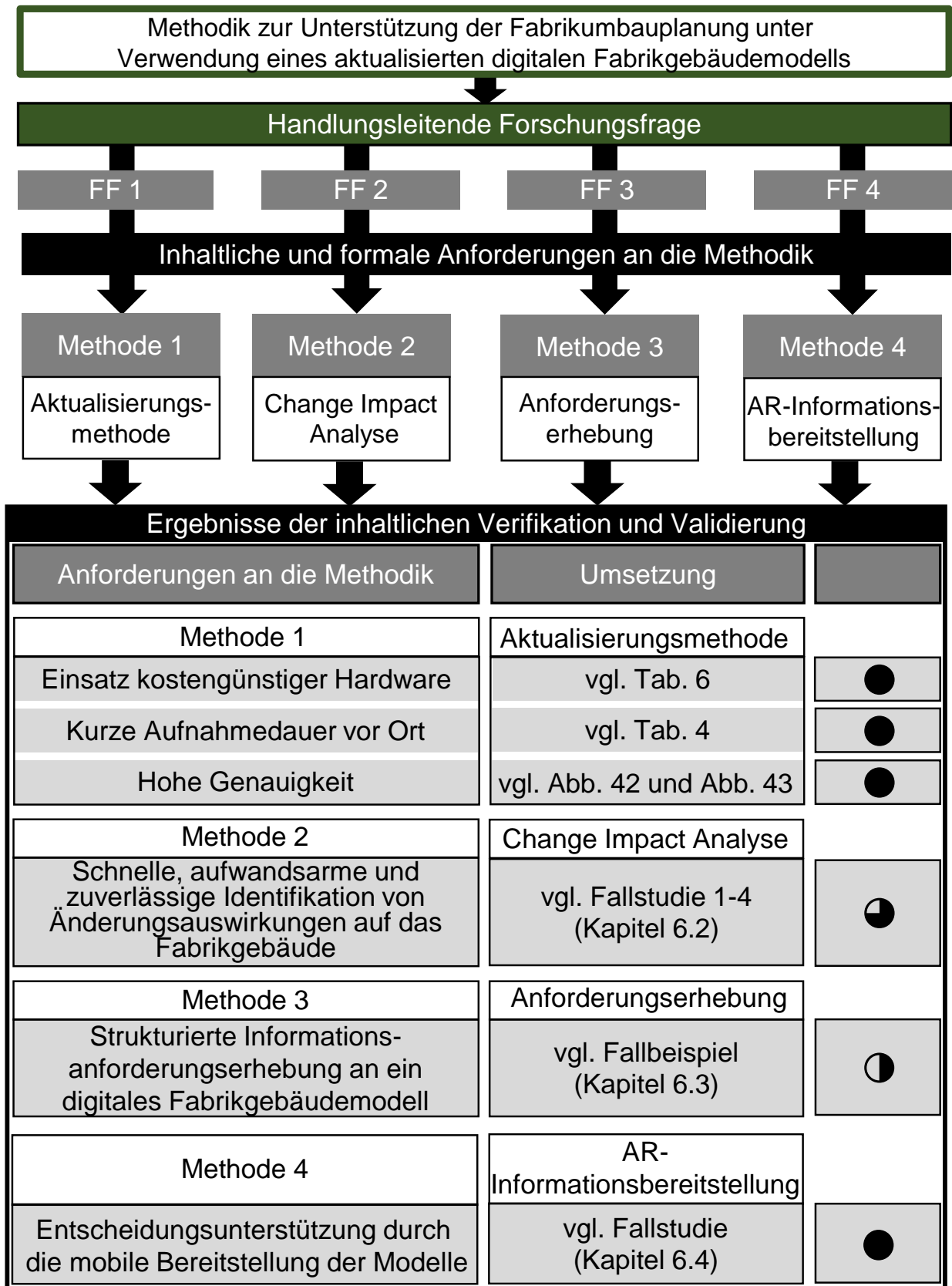
Zur Beantwortung der dritten **FF „Wie können Informationsanforderungen der beteiligten Planer bei einem Fabrikumbau aus der Produktions- und Industriebauplanung an das digitale Fabrikgebäudemodell erhoben werden?“** wurde eine Methode zur Informationsanforderungserhebung entwickelt. Die Anwendung des angepassten Requirements Engineerings ermöglicht die Erfassung von Informationsanforderungen an ein digitales Fabrikgebäudemodell und vermeidet durch die strukturierte Vorgehensweise Ineffizienzen. Die Zusammenstellung der benötigten Modellinhalte (Informationsanforderungen) erfolgt durch den BIM-Gesamtkoordinator in der Informationsanforderungsliste. Die erfassten Informationsanforderungen können auf die erforderlichen BIM-Objekte projiziert (LOD-Zuordnungsmatrix, Abb. 32) und nachverfolgt werden. Das entwickelte Vorgehen ermöglicht, nach dem Vorbild des Axiomatischen Designs, für den Fabrikumbau eine transparente Darstellung der notwendigen Modellinhalte. Bei fehlenden Modellinhalten kommt die entworfene Spezifikation für die Lieferung von digitalen Modellinhalten zur Anwendung. Aufgrund der initialen Erfassung der Informationsanforderungen durch die entwickelte Anforderungsschablone (Abb. 31) und der systematischen Zuordnungsmöglichkeit der Informationsanforderungen mithilfe der LOD-Zuordnungsmatrix (Abb. 32) kann die Bereitstellung einer systematischen Anforderungserhebung durch Überprüfung der Anforderungen (Kapitel 6.3) an die Methodik als formal erfüllt betrachtet werden (Abb. 52). Die Erfüllung der Anforderungen wurde durch den Nachweis erbracht, dass für die ermittelten Anforderungen ein ausgestalteter Bestandteil zur Vorgehensweise in der Methode zur Informationsanforderungserhebung existiert. Da für Methode 3 ausschließlich eine Verifikation und keine Validierung durchgeführt wurde, ist der Erfüllungsgrad insgesamt als „teilweise erfüllt“ (Abb. 52) einzustufen.

Um die **FF 4 „Wie kann der Zugriff auf das digitale Fabrikgebäudemodell während des Umbauprozesses in der Fabrik bereitgestellt werden, um Entscheidungen zu unterstützen?“** zu beantworten, wurde ein AR-Softwarewerkzeug konzipiert und entwickelt. Als Anforderung sollte auf das digitale Fabrikgebäudemodell zugegriffen werden können, um dessen Modellinhalte mobil darzustellen. Das entwickelte AR-Softwarewerkzeug basiert auf der Einblendung von digitalen, dreidimensionalen Fabrikelementen auf dem Grundriss bzw. Layout der Fabrik, die aus



dem aktualisierten BIM-Modell der Fabrik stammen. Die Bewertungsergebnisse der durchgeführten Fallstudie (Kapitel 6.4) zeigen hinsichtlich der Wiedergabedimensionen, dass das AR-Softwarewerkzeug die Planer in allen Wiedergabedimensionen visuell und informativ bei der Entscheidungsfindung im Rahmen von Fabrikumbauplanungen unterstützt. Besonderes Potenzial zur Unterstützung der Entscheidungsfindung weist das AR-Softwarewerkzeug bei Funktionalität und Interaktivität auf (Abb. 51). Modellinhalte können nach Bedarf eingebledet und Informationen kontextbezogen abgerufen werden. Keinen signifikanten Mehrwert des AR-Softwarewerkzeugs gegenüber dem 2D Powerpoint Grundrissplan liefern die Bewertungsergebnisse in den Wiedergabedimensionen „räumliche Orientierung“ und „Farbwirkung“. Bei der „räumlichen Orientierung“ ist der geringe Unterschied darauf zurückzuführen, dass bereits anhand des 2D Grundrissplans die rotatorische Lage der Aufbauten im Produktionsbereich gut beurteilt und eingeschätzt werden kann. Die Wiedergabedimension der „Farbwirkung“ wurde bei der Wiedergabetreue des AR-Softwarewerkzeugs nur unwesentlich höher bewertet, da der zur Verfügung gestellte und in Planung befindliche Aufbau, der in der Fallstudie visualisiert wurde, keine Oberflächentexturen beinhaltet hat. Der Aufbau für die zukünftige Flächenbelegung wurde daher vollständig in grau dargestellt, was für die Beurteilung der Farbwirkung hinderlich war. Die als Anforderung gestellte mobile Bereitstellung der Fabrikgebäudemodelle wird vom entwickelten AR-Softwarewerkzeug zur Informationsbereitstellung unterstützt, weist jedoch Potenzial zur Weiterentwicklung auf (Kapitel 7.3). Durch die durchweg höhere Bewertung der Wiedergabetreue aller Wiedergabedimensionen (Abb. 51) des AR-Softwarewerkzeugs im Vergleich zu den in der Praxis eingesetzten 2D Plänen (Kapitel 6.4) und der erfolgreichen mobilen Bereitstellung der Fabrikgebäudemodelle wird der Erfüllungsgrad von Methode 4 als „vollständig erfüllt“ erachtet (Abb. 52).

Werden die formalen Anforderungen an die Methodik analysiert, muss für die empirische und formale Richtigkeit maßgeblich die Methode 1 und 2 mit den Ergebnissen der Aktualisierungsmethode und dem Modell der Interdependenzen überprüft werden. Bei der Validierung der Aktualisierungsmethode wird die Richtigkeit der Messungen durch die Anzahl von drei erstellten Datensätzen mit jedem eingesetzten Erfassungsgerät sichergestellt und als vollständig erfüllt bewertet. Ebenfalls weisen die Ergebnisse der Change Impact Analyse des Softwarewerkzeugs keine Widersprüche auf und lassen sich beliebig oft reproduzieren. Der Aufwand zur Anwendung der Methodik in Kapitel 6 weist vor allem bei Methode 4 einen nicht unerheblichen Arbeitsaufwand bei der Erstellung und Anpassung des AR-Softwarewerkzeugs auf. Die Integration von vielfältigen Informationen, die mit dem UI korrekt verknüpft werden müssen, liefern ein großes Fehlerpotenzial, was mit mehrfachen Testläufen und nachfolgenden Korrekturen verbunden ist. Daher wird eine einfache Handhabbarkeit der Methodik als überwiegend erfüllt gewertet.



FF: Forschungsfrage

- vollständig erfüllt    ◐ überwiegend erfüllt    ◑ teilweise erfüllt    ◒ kaum erfüllt  
 ○ nicht erfüllt

Abb. 52: Bewertung der Methodik basierend auf der durchgeführten Verifikation und Validierung



## 7 Schlussbetrachtung

Die Schlussbetrachtung beinhaltet die Zusammenfassung der Arbeit (Kapitel 7.1) und einen Ausblick auf Möglichkeiten für zukünftige Forschungsaktivitäten (Kapitel 7.2).

### 7.1 Zusammenfassung

Turbulenzen im Unternehmensumfeld der industriellen Produktion führen zu immer häufiger auftretenden Umbaumaßnahmen innerhalb einer Fabrik und stellen die Wirtschaftsunternehmen vor dem Hintergrund der wachsenden industriellen Komplexität und Vernetzung fortlaufend vor neue Herausforderungen. Während des Betriebs einer Fabrik müssen bspw. aufgrund neuer Marktanforderungen Entscheidungen zur Anpassung der Fabrikgebäudestrukturen unter hohem Zeitdruck getroffen werden. Die innerbetrieblichen Entscheidungen basieren oftmals nicht auf aktuellen und belastbaren Daten. Die reaktive Anpassungsfähigkeit der Fabrikgebäude auf Grundlage aktueller Modelle und Daten ist daher zu einem entscheidenden Wettbewerbsfaktor geworden. Aufgrund der zahlreich bestehenden Wechselwirkungen zwischen dem Produktionsbereich und dem umschließenden Fabrikgebäude wird nach einer Methodik zur Unterstützung der Fabrikumbauplanung verlangt.

In der vorliegenden Arbeit wurde deshalb eine Methodik zur Unterstützung der Fabrikumbauplanung unter Verwendung eines aktuellen digitalen Fabrikgebäudemodells entwickelt. Die Prozesse, die der Aktualisierung des digitalen Fabrikgebäudemodells in der Phase der Informationsbeschaffung (Methode 1, Abb. 21) nachgelagert stattfinden und Teil des Prozesses der Fabrikumbauplanung sind, werden ebenfalls adressiert:

- Phase: Informationsauswertung → Change Impact Analyse (Methode 2)
- Phase: Strukturplanung → Informationsanforderungserhebung (Methode 3)
- Phase: Informationsbereitstellung → AR-Informationsbereitstellung (Methode 4)

Die Anwendung der Methodik unterstützt somit zukünftig den Prozess der Fabrikumbauplanung und führt zur Reduktion der Reaktionszeit, indem notwendige Umplanungsmaßnahmen direkt mit Bezug auf aktuelle digitale Fabrikgebäudemodelle beginnen können.

Die Einführung in die Thematik und Problemstellung erfolgt in Kapitel 1. Dazu wird die handlungsleitende Forschungsfrage formuliert: Wie können produzierende Unternehmen beim Prozess der

Fabrikumbauplanung hinsichtlich der Fabrikgebäude unterstützt werden, um den bisherigen Defiziten in der Erkenntnis- und Vorbereitungsphase zu begegnen? Anschließend werden zur Beantwortung der Forschungsfrage die Zielsetzung und das darauf zugeschnittene Forschungsvorgehen sowie der Aufbau der Arbeit vorgestellt.

Im zweiten Kapitel erfolgt die Erarbeitung wesentlicher und für das Verständnis der Arbeit notwendiger Grundlagen und Begriffsbestimmungen der Fabrik- und Industriebauplanung. Im Kapitel zum Stand der Wissenschaft und Technik werden bestehende Ansätze zur Aktualisierung, Auswirkungsidentifikation, Informationsanforderungserhebung und Informationsbereitstellung analysiert sowie bewertet, um den Forschungsbedarf zu präzisieren. Mit Bezug zu den identifizierten Defiziten bestehender Ansätze werden die Anforderungen in Kapitel 4 abgeleitet und den vier Forschungsfragen folgend, vier Methoden konzipiert, welche die inhaltlichen und formalen Anforderungen adressieren. Darauf aufbauend folgt in Kapitel 5 die detaillierte Ausarbeitung der eigenständigen Methoden 1 bis 4. Den Schwerpunkt der Arbeit stellt die Methode 1 dar, die das Vorgehen zur Aktualisierung digitaler Fabrikgebäudemodelle, basierend auf Photogrammetrie, beinhaltet. Die Methoden 2, 3 und 4 stellen die Aktualisierungsmethode in den Kontext der Fabrikumbauplanung und bieten methodische Lösungsbausteine und Softwarewerkzeuge zur Unterstützung der weiteren Prozesse der Fabrikumbauplanung. Dazu werden in Methode 2 zunächst Auswirkungen automatisiert auf das Fabrikgebäude identifiziert. Nach Kenntnis der Auswirkungen werden die Informationsanforderungen der an der Umbauplanung beteiligten Planungsdisziplin und Fachplanung erhoben und die für die Umbauplanung notwendigen Informationen ermittelt. In der abschließenden Methode 4 werden die aktuellen Fabrikgebäudemodelle mithilfe eines AR-Softwarewerkzeugs vor Ort bereitgestellt und dienen als Entscheidungsunterstützung. Die Verifikation und Validierung der Methodik erfolgen in Kapitel 6. Zur Validierung des Aktualisierungsprozesses (Methode 1) wird mit einem Hersteller von Laserscannern eine Fallstudie durchgeführt. In der Fallstudie wird der entwickelte Aktualisierungsprozess, der auf photogrammetrischen Aufnahmen basiert, dem in der Praxis zur Aktualisierung verwendeten Verfahren, Laserscanning, gegenübergestellt und anschließend bzgl. seiner Praxistauglichkeit als geeignet bewertet. Zur Validierung von Methode 2 wird die Change Impact Analyse anhand von vier Fallstudien praxisnah geprüft. Als Ergebnis der Validierung konnte festgestellt werden, dass die entwickelte Change Impact Analyse Auswirkungen zuverlässig identifizieren kann. Für Methode 3 (Informationsanforderungserhebung) erfolgte eine formale Verifikation mit dem Ergebnis, dass alle gestellten Anforderungen in der Methode adressiert werden. Zur Validierung von Methode 4 wurde das entwickelte AR-Softwarewerkzeug anhand einer Fallstudie geprüft. Das Bewertungsergebnis der Fallstudie attestiert dem AR-Softwarewerkzeug einen Mehrwert gegenüber in der Praxis eingesetzten 2D Plänen.

Die methodischen und anwendungsorientierten Neuentwicklungen (Abb. 53) leisten als Methoden einen Beitrag zum übergeordneten Ziel der Methodik, den Prozess der Fabrikumbauplanung

zu unterstützen und die Reaktionszeit durch die Erhöhung der Veränderungsgeschwindigkeit (Abb. 8) bei Umbauplanungen innerhalb einer Fabrik zu reduzieren. Dazu tragen die einzelnen Methoden entlang des Prozesses der Fabrikumbauplanung durch methodische Hilfestellungen bei. Außerdem unterstützen die entwickelten Softwarewerkzeuge bei der praktischen Durchführung der Planungs- und Arbeitsschritte. Zur Verkürzung der Reaktionszeit wurde die im Prozess der Fabrikumbauplanung vorkommende Phase „Informationsbeschaffung“ fokussiert betrachtet. Entsprechend zu den existierenden Ansätzen zur Verkürzung von Prozessen wurde die Eliminierung eines Prozessschrittes verfolgt. Dazu konnte in der Phase der „Informationsbeschaffung“ durch Vorhalten von aktuellen digitalen Fabrikgebäudemodellen ein Beitrag zur Eliminierung der in der Praxis verbreiteten ad hoc Bestandserfassung geleistet werden. Die Umbauplanungsmaßnahmen können somit direkt auf belastbare Planunterlagen zurückgreifen und durchgeführt werden, ohne zeitaufwändige Datenaufnahmen vor Ort ausführen zu müssen.

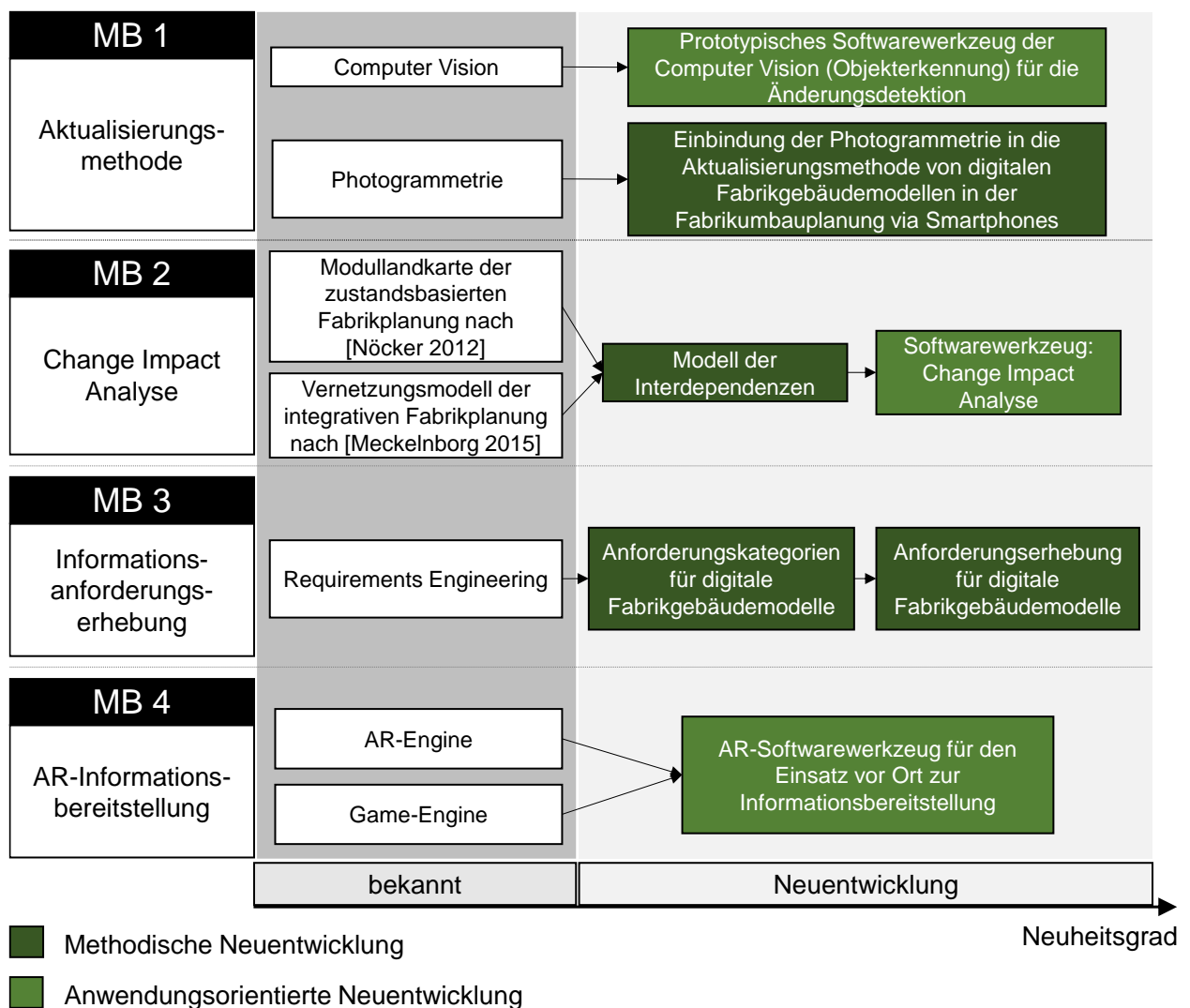


Abb. 53: Gesamtübersicht der entwickelten Methodik mit Eigenentwicklungsanteil

Die Kombination der entwickelten Methoden und der Zusammenfassung in einer Methodik ermöglicht es, die beteiligten Planer bei der komplexen Fabrikumbauplanung zu unterstützen und die Prozessschritte zielorientiert anzugehen. Die Ergebnisse der Verifikation und Validierung der entwickelten Methoden mit den dazugehörigen Softwarewerkzeugen (Abb. 53), welche die bestehenden Defizite der Erkenntnis- und Vorbereitungsphase adressieren, zeigen das Unterstützungspotenzial auf und beantworten so die handlungsleitende Forschungsfrage. Die vorliegende Arbeit leistet somit einen erkennbaren Beitrag zur Unterstützung der Fabrikumbauplanung und Verkürzung der Reaktionszeit. Die Methodik trägt übergeordnet zur Erhaltung der Wettbewerbsfähigkeit von produzierenden Unternehmen bei.

## **7.2 Ausblick**

Die entwickelte Methodik zur Unterstützung der Fabrikumbauplanung mit der ausgearbeiteten Aktualisierungsmethode liefert eine erste Grundlage für den dauerhaften und unterstützenden Einsatz von digitalen Fabrikgebäudemodellen in der Betriebsphase von Fabriken. In weiteren Forschungsarbeiten gilt es das Verhältnis zwischen dem Mehraufwand durch die kontinuierlich mitlaufenden Aktualisierungsmaßnahmen und dem Aufwand, der durch ad hoc Aufnahmen entsteht, zu untersuchen.

Die vorgestellte Aktualisierungsmethode, basierend auf Photogrammetrie, ist nicht nur für Fabrikgebäude anwendbar, sondern eignet sich prinzipiell für jede Art von Gebäuden. Die Erzeugung von digitalen geometrischen Modellen und deren Aktualisierung stellt nur ein Baustein auf dem Weg zu durchgängig nutzbaren digitalen Gebäudezwillingen dar. Weiterführende Arbeiten sollten sich der Aktualisierung weiterer Datenquellen wie den Sensordaten (z.B. Temperatur, CO<sub>2</sub> etc.) widmen und diese interpretieren, um ein dynamisches Abbild eines Fabrikgebäudes zu erhalten. Daraus ergeben sich gänzlich neue Mehrwerte und Anwendungsfelder für den Fabrik- und Gebäudebetrieb. Auch die bereits angedeutete zukünftige Verwendung von Smartphones und anderen mobilen Endgeräten bildet einen Zwischenschritt zu vollautomatisierten Aufnahmen, beispielsweise mit Robotern oder Drohnen. Die Integration von Erfassungsprozessen in der Produktion [Schindler 2019], mit dem vorliegenden Ansatz und anderen Ansätzen aus dem Gebäudebereich, ist noch nicht abgeschlossen. Hier bedarf es zukünftig weiterer Synchronisationsmaßnahmen, um weniger redundante Erfassungsmaßnahmen in einem Fabrikgebäude parallel durchführen zu müssen. Ein zukünftiges Forschungsfeld kann außerdem die Untersuchung sein, in welcher Form digitale Aktualisierungsansätze in bestehende zyklische Fabrikplanungsprozesse eingreifen und diese nachhaltig verändern. Wie bereits in vorherigen Kapiteln erläutert, kann bei direkten Messverfahren, wie dem Laserscanning, die erreichte Aufnahmegenaugigkeit unmittelbar ausgewiesen und kontrolliert werden. Die Genauigkeit hängt bei Laserscannern maßgeblich von

der gewählten Messkonfiguration und dem eingesetzten Gerät ab. Um bei der Photogrammetrie eine ähnliche Robustheit des Verfahrens zu erreichen, sollten zukünftige Forschungsarbeiten die bisherige Abhängigkeit der Ergebnisse einer photogrammetrischen 3D-Auswertung von äußeren Einflüssen, Annahmen, Parametern und Modellen adressieren. Basierend auf den Daten des Verfahrensvergleichs zur Aktualisierung in der Validierung ist zu erwarten, dass photogrammetrische Verfahren zukünftig durch den Einsatz noch modernerer Aufnahmegерäte mit höherer Auflösung immer bessere Ergebnisse hinsichtlich der Bestandserfassung von Gebäuden liefern.

Für die weiteren Methoden, wie der Change Impact Analyse, besteht ebenfalls Weiterentwicklungspotenzial. Hier kann bspw. eine Optimierung dahingehend durchgeführt werden, dass der Anwender vor dem Einsatz des Softwarewerkzeugs die Möglichkeit bekommt, gezielt unbetroffene Planungsmodule „auszuschalten“, um so eine höhere Genauigkeit der Ergebnisse zu erreichen. Dem bisher statischen Modell der Interdependenzen kann so eine Dynamik verliehen werden.

Für die Informationsanforderungserhebung (Methode 3) würde die Synchronisation der Fabrikobjekte mit den in der Bauplanung gebräuchlichen Kostengruppen der DIN 276, welche die Strukturierung des Gebäudes darstellen, eine Weiterentwicklung bedeuten. Das AR-Softwarewerkzeug (Methode 4) unterstützt derzeit ausschließlich die Einblendung der BIM-Modelle, nicht jedoch der aktualisierten Punktwolken. Eine erstrebenswerte Weiterentwicklung, stellt somit die mobile Augmentierung der Punktwolken dar.



## Literaturverzeichnis

- [Adán et al. 2020] Adán, A.; Quintana, B.; Prieto, S. A.; Bosché, F. (2020): An autonomous robotic platform for automatic extraction of detailed semantic models of buildings. In: *Automation in Construction* 109, S. 1–20.
- [Adán et al. 2018] Adán, A.; Quintana Galera, B.; Prieto, S.; Bosché, F. (2018): Scan-to-BIM for 'secondary' building components. In: *Advanced Engineering Informatics* 37, S. 119–138.
- [Aggteleky 1981] Aggteleky, B. (1981): *Grundlagen, Zielplanung, Vorarbeiten, unternehmerische und systemtechnische Aspekte*. 3 Bände. München: Hanser (Fabrikplanung : Werksentwicklung u. Betriebsrationalisierung, 1).
- [Akcamete et al. 2010] Akcamete, A.; Akinci, B.; Garrett, J. (2010): Potential utilization of building information models for planning maintenance activities. In: *Proceedings of the International Conference on Computing in Civil and Building Engineering*, S. 1–8.
- [Alshorafa & Ergen 2019] Alshorafa, R.; Ergen, E. (2019): Determining the level of development for BIM implementation in large-scale projects: A multi-case study. In: *Engineering, Construction and Architectural Management* 28 (1), S. 397–423.
- [Amer & Golparvar-Fard 2018a] Amer, F.; Golparvar-Fard, M. (2018): Crowed-Sourced Visual Data Collection for Monitoring Indoor Construction in 3D. In: *Proceedings of the Second European and Mediterranean Structural Engineering and Construction Conference*, Bd. 5, S. 1–6.
- [Amer & Golparvar-Fard 2018b] Amer, F.; Golparvar-Fard, M. (2018): Decentralized Visual 3D Mapping of Scattered Work Locations for High-Frequency Tracking of Indoor Construction Activities. In: *Proceedings of the Construction Research Congress*, S. 491–500.
- [Antova & Tanev 2020] Antova, G.; Tanev, V. (2020): Creation of 3D Geometry in Scan-to-CAD/BIM Environment. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 609, S. 1–8.
- [Asadi et al. 2019] Asadi, K.; Ramshankar, H.; Noghabaei, M.; Han, K. (2019): Real-Time Image Localization and Registration with BIM Using Perspective Alignment for Indoor Monitoring of Construction. In: *Journal of Computing in Civil Engineering* 33 (5), S. 1–15.
- [Asadpour 2021] Asadpour, A. (2021): Documenting Historic Tileworks Using Smartphone-based Photogrammetry. In: *Mersin Photogrammetry Journal*, S. 15–20.
- [Awrangjeb 2015] Awrangjeb, M. (2015): Effective Generation and Update of a Building Map Database Through Automatic Building Change Detection from LiDAR Point Cloud Data. In: *Remote Sensing* 7, S. 14119–14150.
- [Aziz et al. 2016] Aziz, N. D.; Nawawi, A. H.; Ariff, N. R. M. (2016): Building Information Modelling (BIM) in Facilities Management: Opportunities to be Considered by Facility Managers. In: *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 234, S. 353–362.
- [Baik 2019] Baik, A. (2019): From point cloud to existing bim for modelling and simulation purposes. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives* (42), S. 15–19.
- [Bartels 2020] Bartels, N. (2020): *Strukturmodell zum Datenaustausch im Facility Management*. Dissertation. Technische Universität Dresden. Baubetriebswesen und Bauverfahrenstechnik

- [Bauer et al. 2020] Bauer, H.; Haase, P.; Sippl, F.; Ramakrishnan, R.; Schilp, J.; Reinhart, G. (2020): Modular change impact analysis in factory systems. In: *Production Engineering* 14 (4), S. 445–456.
- [Bauernhansl et al. 2016] Bauernhansl, T.; Krüger, J.; Reinhart, G.; Schuh, G. (2016): WGP-Standpunkt Industrie 4.0. Unter Mitarbeit von Eberhard Abele. Hg. v. Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik Wgp e.v. Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik Wgp e.v. Darmstadt.
- [Becker 2011] Becker, S. (2011): Automatische Ableitung und Anwendung von Regeln für die Rekonstruktion von Fassaden aus heterogenen Sensordaten. Dissertation. Universität Stuttgart. Institut für Photogrammetrie.
- [Behrens et al. 2018] Behrens, B.-A.; Groche, P.; Krüger, J.; Wulfsberg, J. (2018): WGP-Standpunkt Industriearbeitsplatz 2025. Unter Mitarbeit von Berend Denkena. Hg. v. Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik Wgp e.v. Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik Wgp e.v. Hannover.
- [Beller 2010] Beller, M. (2010): Entwicklung eines prozessorientierten Vorgehensmodells zur Fabrikplanung. Dissertation. Technische Universität Dortmund.
- [Bergholz 2005] Bergholz, M. (2005): Objektorientierte Fabrikplanung. Dissertation. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Fraunhofer Institut Produktionstechnologie.
- [Besl & McKay 1992] Besl, P.; McKay, N. (1992): A method for registration of 3-D shapes. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 14 (2), S. 239–256.
- [Best & Weth 2010] Best, E.; Weth, M. (2010): *Process Excellence. Praxisleitfaden für erfolgreiches Prozessmanagement*. 4. Auflage. Wiesbaden: Gabler.
- [BIM Forum 01.04.2019] LOD Spec 2019, 01.04.2019: Level of Development (LOD) Specification 2019 Part I & Commentary.
- [Blankenbach 2016] Blankenbach, J. (2016): Bauaufnahme, Gebäudeerfassung und BIM. In: Willi Freeden und Reiner Rummel (Hg.): *Handbuch der Geodäsie*, Bd. 6. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 1–31.
- [Blumenau 2006] Blumenau, J.-C. (2006): *Lean Planning unter besonderer Berücksichtigung der Skalierung wandlungsfähiger Produktionssysteme*. Dissertation. Lehrstuhl für Fertigungstechnik/CAM.
- [Bogner 2014] Bogner, A. (2014): *Interviews mit Experten : Eine praxisorientierte Einführung*. Wiesbaden: Springer VS (Springer eBook Collection).
- [Böke et al. 2020] Böke, J.; Knaack, U.; Hemmerling, M. (2020): Prototype of a cyber-physical façade system. In: *Journal of Building Engineering* 31, S. 1–12.
- [Bolshakov et al. 2020] Bolshakov, N.; Badenko, V.; Yadykin, V.; Celani, A.; Fedotov, A. (2020): Digital twins of complex technical systems for management of built environment. In: *IOP Conference Series* (Hg.): *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. XXIII International Scientific Conference on Advance in Civil Engineering: "Construction - the Formation of Living Environment" (FORM-2020), Bd. 869. International Scientific Conference on Advance in Civil Engineering. Hanoi, Vietnam, 23.09.2020-26.09.2020 (869), S. 1–8.
- [Bracht et al. 2018] Bracht, U.; Geckler, D.; Wenzel, S. (2018): *Digitale Fabrik: Methoden und Praxisbeispiele*. VDI-Buch. 2. Aufl. 2018. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg (SpringerLink : Bücher).
- [Bradley et al. 2016] Bradley, A.; Li, H.; Lark, R.; Dunn, S. (2016): BIM for infrastructure: An overall review and constructor perspective. In: *Automation in Construction* 71, S. 139–152.

- [Braun et al. 2015] Braun, A.; Tuttas, S.; Borrmann, A.; Stilla, U. (2015): Automated Progress Monitoring Based on Photogrammetric Point Clouds and Precedence Relationship Graphs. In: Proceedings of the 32nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining (ISARC 2015), S. 1–7.
- [Brilakis et al. 2011] Brilakis, I.; Fathi, H.; Rashidi, A. (2011): Progressive 3D reconstruction of infrastructure with videogrammetry. In: Automation in Construction 20 (7), S. 884–895.
- [Burak Gunay et al. 2019] Burak Gunay, H.; Shen, W.; Newsham, G. (2019): Data analytics to improve building performance: A critical review. In: Automation in Construction 97, S. 96–109.
- [Burggräf 2012] Burggräf, P. (2012): Wertorientierte Fabrikplanung. Dissertation. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Fakultät für Maschinenwesen.
- [Burggräf et al. 2021a] Burggräf, P.; Adlon, T.; Schupp, S.; Fölling, C.; Dannapfel, M. (2021): Die Modullandkarte des Aachener Fabrikplanungsvorgehens. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 116 (12), S. 866–871.
- [Burggräf et al. 2021b] Burggräf, P.; Bergs, T.; Dannapfel, M.; Korff, A.; Ebade Esfahani, M.; Splettstoesser, A.; Steinlein, J. (2021): Achieving parametric transparency in model-based factory planning. In: Production Engineering 15, S. 57–67.
- [Burggräf et al. 2019] Burggräf, P.; Dannapfel, M.; Schneidermann, D.; Esfahani, M.; Schwamborn, N. (2019): Integrated Factory Modelling: Using BIM to disrupt the Interface between Manufacturing and Construction in Factory Planning. In: WTI Transactions on the Built Environment 192, S. 143–155.
- [Burggräf et al. 2018] Burggräf, P.; Ebade Esfahani, M.; Bertling, M.; Dannapfel, M. (2018): Factory-BIM zur integrierten Produktions- und Gebäudeplanung. In: Proceedings of the CPP Conference, S. 155–166.
- [Burggräf et al. 2020] Burggräf, P.; Ebade Esfahani, M.; Dannapfel, M.; Schwamborn, N. (2020): How to Improve Collaboration Efficiency in the Built Environment of Factories by Using an Integrated Factory Modelling Concept – An Expert Study. In: International Journal of Design & Nature and Ecodynamics 15, S. 473–481.
- [Busen et al. 2015] Busen, T.; Knechtel, M.; Knobling, C.; Nagel, E.; Schuller, M.; Todt, B. (2015): Bauaufnahme. Münster: Edition MV-Wissenschaft (Architecture).
- [Bussemer et al. 2018] Bussemer, F.; Schmitz, J.; Nyhuis, P. (2018): Projektkonfiguration in der Fabrikplanung. Methode zur Restrukturierung von Fertigungs- und Montagebereichen. In: wt Werkstattstechnik online 108 (4), S. 240–244.
- [Caroti et al. 2017] Caroti, G.; Piemonte, A.; Nespoli, R. (2017): UAV-Borne photogrammetry: a low cost 3D surveying methodology for cartographic update. In: MATEC Web of Conferences 120 (4), S. 1–10.
- [Chatzifoti 2016] Chatzifoti, O. (2016): On the Popularization of Digital Close-Range Photogrammetry. A Handbook for new Users. Dissertation. National University of Athens. Laboratory of Photogrammetry.
- [Cheong & Lee 2018] Cheong, H.-W.; Lee, H. (2018): Concept Design of AGV (Automated Guided Vehicle) Based on Image Detection and Positioning. In: Procedia Computer Science 139, S. 104–107.
- [Chetverikov et al. 2005] Chetverikov, D.; Stepanov, D.; Krsek, P. (2005): Robust Euclidean alignment of 3D point sets: the trimmed iterative closest point algorithm. In: Image and Vision Computing 23 (3), S. 299–309.
- [Cisek 2005] Cisek, R. (2005): Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen. Dissertation. München. Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik.

- [Clausen et al. 2003] Clausen, G.; De Oliveira Fernandes, E.; Delmotte, C.; Hanssen, S. O.; Kephelopoulos, S.; Lemaire, M.-C. et al. (2003): Ventilation, Good Indoor Air Quality and Rational Use of Energy. Luxembourg: European Communities (Environment and Quality of Life), zuletzt geprüft am 13.10.2020.
- [Czerniawski & Leite 2020] Czerniawski, T.; Leite, F. (2020): Automated digital modeling of existing buildings: A review of visual object recognition methods. In: Automation in Construction 113, S. 1–19.
- [Dannapfel et al. 2019] Dannapfel, M.; Vierschilling, S. P.; Leenders, L.; Saraña, P. (2019): Integrierte Entscheidungen in der Fabrikplanung. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 114 (9), S. 521–524.
- [Davies et al. 2017] Davies, K.; Wilkinson, S.; McMeel, D. (2017): A review of specialist role definitions in BIM guides and standards. In: Journal of Information Technology in Construction (22), S. 185–203.
- [Deimling 2019] Deimling, C. von (2019): Konzeptioneller Bezugsrahmen für Einkaufskooperationen. In: Christian von Deimling (Hg.): Komplexitätsmanagement in multinationalen Einkaufskooperationen am Beispiel des Verteidigungssektors. Wiesbaden: Springer Fachmedien, S. 109–220.
- [Delbrügger et al. 2017] Delbrügger, T.; Döbbeler, F.; Graefenstein, J.; Lager, H.; Lenz, L. T.; Meißner, M. et al. (2017): Anpassungsintelligenz von Fabriken im dynamischen und komplexen Umfeld. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 112 (6), S. 364–368.
- [DIN 18202 2019] DIN 18202, 2019: DIN 18202 - Toleranzen im Hochbau - Bauwerke, DIN - Deutsches Institut für Normung e.V.
- [DIN 18710-1 2010] DIN 18710-1, 2010: DIN 18710-1: Ingenieurvermessung - Teil 1: Allgemeine Anforderungen, DIN - Deutsches Institut für Normung e.V.
- [DIN 276 2018] DIN 276, 2018: DIN 276 - Kosten im Bauwesen, DIN - Deutsches Institut für Normung e.V.
- [DIN EN ISO 12006-2 2020] DIN EN ISO 12006-2, 2020: 12006-2: Hochbau – Organisation des Austausches von Informationen über die Durchführung von Hoch- und Tiefbauten - Teil 2: Struktur für die Klassifizierung, DIN - Deutsches Institut für Normung e.V.
- [DIN EN ISO 19650-1 2019] DIN EN ISO 19650-1, 2019: DIN EN ISO 19650-1: Organisation und Digitalisierung von Informationen zu Bauwerken und Ingenieurleistungen, einschließlich Bauwerksinformationsmodellierung (BIM) – Informationsmanagement mit BIM – Teil 1: Begriffe und Grundsätze (ISO 19650-1:2018), DIN - Deutsches Institut für Normung e.V.
- [DIN EN ISO 29481-1 2018] DIN EN ISO 29481-1, 2018: 29481-1: Bauwerksinformationsmodelle – Handbuch der Informationslieferungen – Teil 1: Methodik und Format, DIN - Deutsches Institut für Normung e.V.
- [DIN EN ISO 29481-2 2017] DIN EN ISO 29481-2, 2017: DIN EN ISO 29481-2: Bauwerksinformationsmodelle – Handbuch der Informationslieferungen – Teil 2: Interaktionsframework (ISO 29481-2:2012), DIN - Deutsches Institut für Normung e.V.
- [DIN EN ISO 9241-11 2018] DIN EN ISO 9241-11, 2018: DIN EN ISO 9241-11: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 11: Gebrauchstauglichkeit: Begriffe und Konzepte, DIN - Deutsches Institut für Normung e.V.
- [DIN EN ISO 9241-110 2020] DIN EN ISO 9241-110, 2020: DIN EN ISO 9241-110: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 110: Interaktionsprinzipien, DIN - Deutsches Institut für Normung e.V.
- [DIN EN ISO 9241-112 2017] DIN EN ISO 9241-112, 2017: DIN EN ISO 9241-112: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 112: Grundsätze der Informationsdarstellung, DIN - Deutsches Institut für Normung e.V.

- [DIN EN ISO 9241-125 2018] DIN EN ISO 9241-125, 2018: DIN EN ISO 9241-125: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 125: Empfehlungen zur visuellen Informationsdarstellung, DIN - Deutsches Institut für Normung e.V.
- [Dombrowski et al. 2011] Dombrowski, U.; Hennersdorf, S.; Celik, M.; Weckenborg, S.; Mielke, T.; Roth, C. et al. (2011): Planungsleitfaden Zukunft Industriebau. Ganzheitliche Integration und Optimierung des Planungs- und Realisierungsprozesses für zukunftsweisende und nachhaltige Industriegebäude. Teil A: Einleitung. Teil B: Szenariotechnik. Teil C: Lebenszyklusbetrachtung. Unter Mitarbeit von Uwe Dombrowski, Antje Voigt, Regina Sonntag, Christian Laviola und Sima Rustom. Hg. v. Fraunhofer IRB. Stuttgart (Forschungsinitiative Zukunft Bau).
- [Donath 2008] Donath, D. (2008): Bauaufnahme und Planung im Bestand. Grundlagen - Verfahren - Darstellung - Beispiele. Unter Mitarbeit von Jörg Braunes und Michael Korte. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- [Döring et al. 2006] Döring, N.; Bortz, J.; Pöschl-Günther, S. (2006): Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften. Unter Mitarbeit von Nicola Döring, Jürgen Bortz und Sandra Pöschl-Günther. 4. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer (Springer-Lehrbuch).
- [Eastman et al. 1974] Eastman, C.; Fisher, D.; Lafue, G.; Lividini, J.; Stoker, D.; Yessios, C. (1974): An Outline of the Building Description System. Research Report No. 50. Hg. v. Carnegie-Mellon University Institute of Physical Planning. Pittsburgh.
- [Ebade Esfahani et al. 2019] Ebade Esfahani, M.; Burggräf, P.; Dannapfel, M.; Schneidermann, D. (2019): Paradigmenwechsel im Fabrikplanungsdatenmanagement. In: wt Werkstattstechnik online 109 (4), S. 260–267.
- [Farid & Suh 2016] Farid, A. M.; Suh, N. P. (2016): Axiomatic Design in Large Systems: Complex Products, Buildings and Manufacturing Systems. Unter Mitarbeit von Amro M. Farid und Nam P. Suh. Cham: Springer (SpringerLink : Bücher).
- [Fawzy 2019] Fawzy, H. E.-D. (2019): 3D laser scanning and close-range photogrammetry for buildings documentation: A hybrid technique towards a better accuracy. In: Alexandria Engineering Journal 58 (4), S. 1191–1204.
- [Fiebig 2004] Fiebig, C. (2004): Synchronisation von Fabrik- und Technologieplanung. Dissertation. Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.
- [Frankenbach et al. 2020] Frankenbach, F.; Riess, A.; Michaeli, P.; Reinhart, G. (2020): Kontextbasierte Rekonfiguration von Fabriksystemen. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 115 (11), S. 751–754.
- [Franz & Vinken 2017] Franz, B.; Vinken, G. (2017): Das Digitale und die Denkmalpflege. Hg. v. Birgit Franz und Gerhard Vinken. Holzminden.
- [Fritsch 2016] Fritsch, D. (2016): Photogrammetrische Auswertung digitaler Bilder – Neue Methoden der Kamerakalibration, dichten Bildzuordnung und Interpretation von Punktwolken. In: Willi Freeden und Reiner Rummel (Hg.): Handbuch der Geodäsie. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 1–40.
- [Galantucci & Fatiguso 2019] Galantucci, R. A.; Fatiguso, F. (2019): Advanced damage detection techniques in historical buildings using digital photogrammetry and 3D surface analysis. In: Journal of Cultural Heritage 36, S. 51–62.
- [Gao et al. 2015] Gao, T.; Akinci, B.; Ergan, S.; Garrett, J. (2015): An approach to combine progressively captured point clouds for BIM update. In: Advanced Engineering Informatics 29 (4), S. 1001–1012.
- [Gebauer & Windheuser 2018] Gebauer, M.; Windheuser, U. (2018): Strukturierte Datenanalyse, Profiling und Geschäftsregeln. In: Knut Hildebrand, Marcus Gebauer, Holger Hinrichs und Michael Mielke (Hg.): Daten- und Informationsqualität. Wiesbaden: Springer Fachmedien, S. 87–100.

- [Graefenstein 2019] Graefenstein, J. (2019): Methodik zur aufgabenorientierten Fabrikplanung. Dissertation. Technische Universität Dortmund. Fakultät Maschinenbau.
- [Graefenstein et al. 2020] Graefenstein, J.; Winkels, J.; Lenz, L.; Weist, K.; Krebil, K.; Gralla, M. (2020): A Hybrid Approach of Modular Planning – Synchronizing Factory and Building Planning by Using Component based Synthesis. In: Tung Bui (Hg.): Proceedings of the 53rd Hawaii International Conference on System Sciences, S. 6580–6588.
- [Grundig 2018] Grundig, C. G. (2018): Fabrikplanung: Planungssystematik - Methoden - Anwendungen. 6. Auflage. München: Hanser.
- [Günther 2015] Günther, T. (2015): Baustellenmanagement im Anlagenbau. Von der Planung bis zur Fertigstellung. Berlin: Springer Vieweg.
- [Gustavsson 2018] Gustavsson, T. K. (2018): Liminal roles in construction project practice: exploring change through the roles of partnering manager, building logistic specialist and BIM coordinator. In: Construction Management and Economics 36 (11), S. 599–610.
- [Hammerschall & Beneken 2013] Hammerschall, U.; Beneken, G. (2013): Software Requirements. München [u.a.]: Pearson Higher Education (Always learning).
- [Harms 2004] Harms, T. (2004): Agentenbasierte Fabrikstrukturplanung. Dissertation. Universität Hannover. Institut für Fabrikanlagen und Logistik.
- [Hartkopf 2013] Hartkopf, M. (2013): Systematik für eine kontinuierliche und langfristig ausgerichtete Planung technologischer und kapazitiver Werksentwicklungen. Dissertation. Universität Stuttgart.
- [Hassan & Fritsch 2019] Hassan, A. T.; Fritsch, D. (2019): Integration of Laser Scanning and Photogrammetry in 3D/4D Cultural Heritage Preservation – A Review. In: International Journal of Applied Science and Technology 9 (4), S. 76–91.
- [Hawer 2020] Hawer, S. (2020): Planung veränderungsfähiger Fabrikstrukturen auf Basis unscharfer Daten. Dissertation. Technische Universität München. Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften.
- [Heesen 2014] Heesen, B. (2014): Wissenschaftliches Arbeiten: Methodenwissen für das Bachelor-, Master- und Promotionsstudium. 3. Aufl. 2014. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler (Springer eBook Collection).
- [Heger 2006] Heger, C. L. (2006): Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Fabrikobjekten. Dissertation. Leibniz Universität Hannover.
- [Heinrich & Klier 2018] Heinrich, B.; Klier, M. (2018): Datenqualitätsmetriken für ein ökonomisch orientiertes Qualitätsmanagement. In: Knut Hildebrand, Marcus Gebauer, Holger Hinrichs und Michael Mielke (Hg.): Daten- und Informationsqualität. Wiesbaden: Springer Fachmedien, S. 47–66.
- [Heisel & Stehle 2009] Heisel, U.; Stehle, T. (2009): Konfiguration und Rekonfiguration von Produktionssystemen. In: Hans-Jörg Bullinger, Dieter Spath, Hans-Jürgen Warnecke und Engelbert Westkämper (Hg.): Handbuch Unternehmensorganisation. Strategien, Planung, Umsetzung. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 448–472.
- [Hellmuth 2020] Hellmuth, R. (2020): Method for requirements elicitation and traceability in a factory building conversion. In: Procedia Manufacturing 51, S. 943–952.
- [Hellmuth 2022] Hellmuth, R. (2022): Update approaches and methods for digital building models – Literature review. In: Journal of Information Technology in Construction (ITcon) 27, S. 191–222.
- [Hellmuth et al. 2020a] Hellmuth, R.; Frohmayer, J.; Sulzmann, F. (2020): Design and Application of a Digital Factory Model for Factory Restructuring. In: Procedia CIRP 91, S. 158–163.

- [Hellmuth et al. 2020b] Hellmuth, R.; Wehner, F.; Giannakidis, A. (2020): Approach for an Update Method for Digital Factory Models. In: *Procedia CIRP* 93, S. 280–285.
- [Hellmuth et al. 2020c] Hellmuth, R.; Wehner, F.; Giannakidis, A. (2020): Datasets of captured images of three different devices for photogrammetry calculation comparison and integration into a laserscan point cloud of a built environment. In: *Data in brief* 33, S. 1–13.
- [Hennersdorf 2011] Hennersdorf, S. (2011): *Auswahlssystematik für Methoden und Werkzeuge der Fabrikplanung*. Dissertation. Technische Universität Braunschweig.
- [Henze 2015] Henze, F. (2015): *Digitale Bildverarbeitung für die automatisierte Auswertung in der Architekturphotogrammetrie*. Dissertation. Technische Universität Cottbus-Senftenberg. Bauwesen und Stadtplanung.
- [Herlynp & Zadek 2020] Herlynp, W. J.; Zadek, H. (2020): Der Digitale Steuerungs-Zwilling. Dynamische Auftrags- und Materialflusssteuerung auf Basis des Konzepts eines Digitalen Steuerungs-Zwillings. In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 115 (special), S. 70–73.
- [Herrmann 2022] Herrmann, A. (2022): *Grundlagen der Anforderungsanalyse. Standardkonformes Requirements Engineering*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- [Hingst et al. 2022a] Hingst, L.; Ast, J.; Nyhuis, P. (2022): Framework for assessing the impact of change on a factory by adapting learning behavior models. In: *Procedia CIRP* 107, S. 393–398.
- [Hingst et al. 2022b] Hingst, L.; Wecken, L.; Brunotte, E.; Nyhuis, P. (2022): Einordnung der Robustheit und Resilienz in die Veränderungsfähigkeit. In: *Journal of Production Systems and Logistics* 2, S. 1-11.
- [HOAI 2021] HOAI (2021): *Verordnung über die Honorare für Architekten und Ingenieurleistungen (Honorarordnung für Architekten und Ingenieure - HOAI)*. HOAI.
- [Horler et al. 2019] Horler, S.; Blocherer, T.; Spang, F.; Riedel, R. (2019): Transformation formaler Systemmodelle in digitale Fabrikmodelle. In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 114 (10), S. 679–682.
- [Horváth et al. 2020] Horváth, P.; Gleich, R.; Seiter, M. (2020): *Controlling*. 14. Aufl. München: Vahlen (Vahle's Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften).
- [Huang et al. 2019] Huang, Z.; Ma, N.; Wang, S.; Peng, Y. (2019): GPU computing performance analysis on matrix multiplication. In: *The Journal of Engineering* (23), S. 9043–9048.
- [Imfeld 2002] Imfeld, A. (2002): *Semantisches Filesystem ObjectSFS*. Diplomarbeit. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. Institute for Information Systems.
- [Jacobi 2013] Jacobi, H.-F. (2013): *Computer Integrated Manufacturing (CIM)*. In: Engelbert Westkämper, Dieter Spath, Carmen Constantinescu und Joachim Lentz (Hg.): *Digitale Produktion*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 51–92.
- [Jiang & Nee 2013] Jiang, S.; Nee, A. (2013): A novel facility layout planning and optimization methodology. In: *CIRP Annals* 62 (1), S. 483–486.
- [Jung 2005] Jung, R. (2005): *Architekturen zur Datenintegration. Gestaltungsempfehlungen auf der Basis fachkonzeptueller Anforderungen*. Habilitationsschrift. Universität St. Gallen.
- [Kalasapudi et al. 2014] Kalasapudi, V. S.; Turkan, Y.; Tang, P. (2014): Toward Automated Spatial Change Analysis of MEP Components Using 3D Point Clouds and As-Designed BIM Models. In: *2014 2nd International Conference on 3D Vision*, Bd. 2, S. 145–152.

- [Kampker et al. 2013] Kampker, A.; Meckelnborg, A.; Netz, T.; Burggräf, P. (2013): Factory Planning Scrum: Integrative Factory Planning with Agile Project Management. In: Proceedings International Conference on Competitive Manufacturing, S. 345–350.
- [Kang et al. 2020] Kang, T.; Patil, S.; Kang, K.; Koo, D.; Kim, J. (2020): Rule-Based Scan-to-BIM Mapping Pipeline in the Plumbing System. In: Applied Sciences 10 (21), S. 1–18.
- [Kerber 2015] Kerber, S. (2015): Prozessgestaltung zum Einsatz digitaler Fabrikgesamtsmodelle: Anwendung in der Produktionsplanung eines Automobilherstellers. Dissertation. Technische Universität Chemnitz.
- [Kerkenberg 2016] Kerkenberg, T. (2016): Digitale Fabrikplanung für zukunftssichere und Industrie 4.0-fähige Produktionssysteme. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 111, S. 104–108.
- [Kersten 2017] Kersten, T. (2017): Untersuchungen zur Qualität und Genauigkeit von 3D-Punktwolken für die 3D-Objektmodellierung auf der Grundlage von terrestrischem Laserscanning und bildbasierten Verfahren. Dissertation. Technische Universität Dresden. Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung.
- [Kersten & Lindstaedt 2012] Kersten, T.; Lindstaedt, M. (2012): Generierung von 3D-Punktwolken durch kamera-basierte low-cost Systeme – Workflow und praktische Beispiele. In: Terrestrisches Laserscanning 69 (121), S. 25–46.
- [Kettner et al. 1984] Kettner, H.; Schmidt, J.; Greim, H.-R. (1984): Leitfaden der systematischen Fabrikplanung. München: Hanser.
- [Kim et al. 2013a] Kim, C.; Son, H.; Kim, C. (2013): Automated construction progress measurement using a 4D building information model and 3D data. In: Automation in Construction 31, S. 75–82.
- [Kim et al. 2013b] Kim, C.; Kim, B.; Kim, H. (2013): 4D CAD model updating using image processing-based construction progress monitoring. In: Automation in Construction 35, S. 44–52.
- [Kokkas & Vosniakos 2019] Kokkas, A.; Vosniakos, G.-C. (2019): An Augmented Reality approach to factory layout design embedding operation simulation. In: Int J Interact Des Manuf 13 (3), S. 1061–1071.
- [Krunke 2017] Krunke, M. (2017): Reifegradmanagement in der Fabrikplanung. Dissertation. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Fakultät für Maschinenwesen.
- [Küber 2017] Küber, C. (2017): Methode zur Planung modularer, produktflexibler Montagekonfigurationen in der variantenreichen Serienmontage. Am Beispiel der Automobilindustrie. Dissertation. Universität Stuttgart.
- [Kubicek 1976] Kubicek, H. (1976): Heuristische Bezugsrahmen und heuristisch angelegte Forschungsdesign als Elemente einer Konstruktionsstrategie empirischer Forschung. Berlin: Inst. für Unternehmungsführung im Fachbereich Wirtschaftswiss. d. Freien Univ (Arbeitspapier, Nr. 16).
- [Kuhlmann & Holst 2016] Kuhlmann, H.; Holst, C. (2016): Flächenhafte Abtastung mit Laserscanning. In: Willi Freeden und Reiner Rummel (Hg.): Handbuch der Geodäsie. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 1–46.
- [Landherr et al. 2013] Landherr, M.; Neumann, M.; Volkmann, J.; Jäger, J.; Kluth, A.; Lucke, D. et al. (2013): Fabriklebenszyklusmanagement. In: Engelbert Westkämper, Dieter Spath, Carmen Constantinescu und Joachim Lentjes (Hg.): Digitale Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer (Springer eBook Collection), S. 163–195.
- [Landherr 2014] Landherr, M. H. (2014): Integrierte Produkt- und Montagekonfiguration für die variantenreiche Serienfertigung. Dissertation. Universität Stuttgart.



- [Latiffi et al. 2014] Latiffi, A. A.; Brahim, J.; Fathi, M. S. (2014): The Development of Building Information Modeling (BIM) Definition. In: *Applied Mechanics and Materials* 567, S. 625–630.
- [Latiffi et al. 2015] Latiffi, A. A.; Brahim, J.; Mohd, S.; Fathi, M. S. (2015): Building Information Modeling (BIM): Exploring Level of Development (LOD) in Construction Projects. In: *Applied Mechanics and Materials* 773-774, S. 933–937.
- [Lee et al. 2016] Lee, Y.-C.; Eastman, C. M.; Solihin, W. (2016): An ontology-based approach for developing data exchange requirements and model views of building information modeling. In: *Advanced Engineering Informatics* 30 (3), S. 354–367.
- [Lehmann 2008] Lehmann, J. (2008): Entwicklung von Methoden zur ganzheitlichen integrierten Planung wandlungsfähiger Fabriken unter Nutzung der Digitalen Fabrik. Dissertation. Technische Universität Chemnitz.
- [Lehner 2003] Lehner, W. (2003): Datenbanktechnologie für Data-Warehouse-Systeme: Konzepte und Methoden. 1. Aufl. Heidelberg: dpunkt (dpunkt-lehrbuch).
- [Leite et al. 2011] Leite, F.; Akcamete, A.; Akinci, B.; Atasoy, G.; Kiziltas, S. (2011): Analysis of modeling effort and impact of different levels of detail in building information models. In: *Automation in Construction* 20 (5), S. 601–609.
- [Lenz 2020] Lenz, L. (2020): Bewertungssystem zur Entscheidungsunterstützung für Fabrikanpassungsprozesse auf Basis von BIM. Dissertation. Technische Universität Dortmund. Fakultät Architektur und Bauingenieurwesen.
- [Lenz et al. 2019] Lenz, L.; Graefenstein, J.; Winkels, J.; Gralla, M. (2019): Smart Factory Adaption Planning by means of BIM in Combination of Constraint Solving Techniques. In: *CIB World Building Congress*, S. 1–11.
- [Liebetruth 2020] Liebetruth, T. (2020): Prozessmanagement in Einkauf und Logistik. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- [Liebich et al. 2013] Liebich, T.; Stuhlmacher, K.; Katranuschkov, P.; Guruz, R.; Nisbet, N.; Kaiser, J. et al. (2013): ICT Platform for Holistic Energy Efficiency Simulation and Lifecycle Management of Public Use Facilities. HESMOS Virtual Energy Lab HESMOS Consortium.
- [Liewald et al. 2022] Liewald, M.; Bergs, T.; Groche, P.; Behrens, B.-A.; Briesenick, D.; Müller, M. et al. (2022): Perspectives on data-driven models and its potentials in metal forming and blanking technologies. In: *Production Engineering* 16 (5), S. 607–625.
- [Lindemann 2009] Lindemann, U. (2009): Methodische Entwicklung technischer Produkte. Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden. 3., korrigierte Aufl. Berlin: Springer (VDI-Buch).
- [Löffler 2011] Löffler, C. (2011): Systematik der strategischen Strukturplanung für eine wandlungsfähige und vernetzte Produktion der variantenreichen Serienfertigung. Dissertation. Universität Stuttgart. Institut für industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb.
- [Louis & Dunston 2018] Louis, J.; Dunston, P. S. (2018): Integrating IoT into operational workflows for real-time and automated decision-making in repetitive construction operations. In: *Automation in Construction* 94, S. 317–327.
- [Lu et al. 2020] Lu, Q.; Xie, X.; Parlikad, A. K.; Schooling, J. M.; Konstantinou, E. (2020): Moving from Building Information Models to Digital Twins for Operation and Maintenance. In: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Smart Infrastructure and Construction*, S. 1–9.
- [Lübkeermann 2016] Lübkeermann, J. (2016): Ermittlung des Restrukturierungsbedarfs von Fabriken. Dissertation. Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover. Institut für Fabrikanlagen und Logistik.

- [Lübke mann & Nyhuis 2016] Lübke mann, J.; Nyhuis, P. (2016): Modellbasierte Restrukturierung von Fabriken. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 111 (1-2), S. 7–10.
- [Luhmann & Maas 2016] Luhmann, T.; Maas, H.-G. (2016): Industriephotogrammetrie. In: Willi Freed en und Reiner Rummel (Hg.): Handbuch der Geodäsie. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 1–51.
- [Macher et al. 2017] Macher, H.; Landes, T.; Grussenmeyer, P. (2017): From Point Clouds to Building Information Models: 3D Semi-Automatic Reconstruction of In-doors of Existing Buildings. In: Applied Sciences 7 (10), S. 1–30.
- [Mahami et al. 2019] Mahami, H.; Nasirzadeh, F.; Hosseininaveh Ahmadabadian, A.; Nahavandi, S. (2019): Automated Progress Controlling and Monitoring Using Daily Site Images and Building Information Modelling. In: Buildings 9 (3), S. 70.
- [Meckelnborg 2015] Meckelnborg, A. (2015): Integrative Fabrikplanung durch effiziente Koordinationsmodelle. Dissertation. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.
- [Meierlohr 2003] Meierlohr, C. (2003): Konzept zur rechnergestützten Integration von Produktions- und Gebäudeplanung in der Fabrikgestaltung. Dissertation. Technische Universität München. Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften.
- [Melcher et al. 2018] Melcher, D.; Küster, B.; Stonis, M.; Overmeyer, L. (2018): Dreidimensionale Fabrikplanung durch Drohneneinsatz. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 113 (5), S. 267–271.
- [Michniewicz et al. 2017] Michniewicz, J.; Leiber, D.; Riedl, F.; Erdogan, H.; Hörmann, M.; Meyer, M. et al. (2017): Automatisierte digitale Anlagenplanung - Methode für die automatisierte Planung von Montageanlagen auf Basis digitaler Produktdaten. In: Werkstattstechnik online 107 (9), S. 582–589.
- [Mikrut et al. 2014] Mikrut, S.; Moskal, A.; Marmol, U. (2014): Integration of Image and Laser Scanning Data Based on Selected Example. In: Image Processing & Communications 19 (2-3), S. 37–44.
- [Minoli et al. 2017] Minoli, D.; Sohraby, K.; Occhiogrosso, B. (2017): IoT Considerations, Requirements, and Architectures for Smart Buildings—Energy Optimization and Next-Generation Building Management Systems. In: IEEE Internet of Things Journal 4 (1), S. 269–283.
- [Mishra et al. 2020] Mishra, S.; Glaws, A.; Cutler, D.; Frank, S.; Azam, M.; Mohammadi, F.; Venne, J.-S. (2020): Unified architecture for data-driven metadata tagging of building automation systems. In: Automation in Construction 120, S. 1–19.
- [Murphy et al. 2013] Murphy, M.; MCGovern, E.; Pavía, S. (2013): Historic building information modelling (HBIM). In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 76, S. 89–102.
- [Nafors 2019] Nafors, D. (2019): On Brownfield Factory Layout Planning. Dissertation. Chalmers University of Technology Gothenburg. Department of Industrial and Materials Science.
- [Nagarajan 2020] Nagarajan, K. (2020): Python script for convert image resolution. Online verfügbar unter <https://gist.github.com/karthick965938/432d189d617824d4960175dea9403243>, zuletzt geprüft am 03.09.2022.
- [Näser & Wickenhagen 2018] Näser, P.; Wickenhagen, N. (2018): Fabrik-Integration in das Building Information Modeling (BIM). Integration von Fabrikplanung und Fabrikbetrieb in das Building Information Modeling (BIM). In: wt Werkstattstechnik online 108 (4), S. 245–250.

- [Neuhäuser et al. 2020] Neuhäuser, T.; Chen, Q.; Rösch, M.; Hohmann, A.; Reinhart, G. (2020): Building Information Modeling im Fabriklebenszyklus. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 115 (special), S. 66–69.
- [Neumann 2014] Neumann, M. (2014): Methode für eine situationsbasierte Adaption und Absicherung der Produktionsfähigkeit in der Serienmontage. Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung. Dissertation. Universität Stuttgart. Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb.
- [NIBS 2012] NIBS (2012): National Building Information Modeling Standard. Version 1 - Part 1: Overview, Principles, and Methodologies. Hg. v. National Institute of Building Sciences.
- [Nöcker 2012] Nöcker, J. C. (2012): Zustandsbasierte Fabrikplanung. Dissertation. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.
- [Ochmann et al. 2019] Ochmann, S.; Vock, R.; Klein, R. (2019): Automatic reconstruction of fully volumetric 3D building models from oriented point clouds. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 151, S. 251–262.
- [Patzak 1982] Patzak, G. (1982): Systemtechnik, Planung komplexer innovativer Systeme: Grundlagen, Methoden, Techniken. Berlin [u.a.]: Springer.
- [Pawellek 2014] Pawellek, G. (2014): Ganzheitliche Fabrikplanung. Grundlagen, Vorgehensweise, EDV-Unterstützung. 2. Aufl. Berlin: Springer Vieweg (VDI-Buch).
- [Pfeifer et al. 2016] Pfeifer, N.; Mandlbürger, G.; Glira, P. (2016): Laserscanning. In: Willi Freuden und Reiner Rummel (Hg.): Handbuch der Geodäsie. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 1–51.
- [Pfohl & Stölzle 1997] Pfohl, H.-C.; Stölzle, W. (1997): Planung und Kontrolle: Konzeption, Gestaltung, Implementierung. 2. Aufl. München: Vahlen (Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften).
- [Plehn et al. 2016] Plehn, C.; Stein, F.; Neufville, R. de; Reinhart, G. (2016): Assessing the Impact of Changes and their Knock-on Effects in Manufacturing Systems. In: Procedia CIRP 57, S. 479–486.
- [Pohl 2013] Pohl, J. (2013): Adaption von Produktionsstrukturen unter Berücksichtigung von Lebenszyklen. Dissertation. Technische Universität München. Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb).
- [Pourzolfaghar & Helfert 2017] Pourzolfaghar, Z.; Helfert, M. (2017): Integration of Buildings Information with Live Data from IoT Devices. In: Zaigham Mahmood (Hg.): Connected Environments for the Internet of Things: Challenges and Solutions. Cham: Springer International Publishing, S. 169–185.
- [Previtali et al. 2020] Previtali, M.; Banfi, F.; Brumana, R. (2020): Handheld 3D Mobile Scanner (SLAM): Data Simulation and Acquisition for BIM Modelling. In: Claudio Parente, Salvatore Troisi und Antonio Vettore (Hg.): R3 in Geomatics: Research, Results and Review. Cham, 2020. Cham: Springer International Publishing, S. 256–266.
- [Pučko et al. 2018] Pučko, Z.; Šuman, N.; Rebolj, D. (2018): Automated continuous construction progress monitoring using multiple workplace real time 3D scans. In: Advanced Engineering Informatics 38, S. 27–40.
- [Rabe et al. 2008] Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S. (2008): Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik: Vorgehensmodelle und Techniken. 1. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer (SpringerLink. Bücher).
- [REFA 1990] REFA (1990): Planung und Gestaltung komplexer Produktionssysteme - Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation. 2. Aufl., München: Hanser (Methodenlehre der Betriebsorganisation).
- [Reinema et al. 2013] Reinema, C.; Pompe, A.; Nyhuis, P. (2013): Agiles Projektmanagement. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 108 (3), S. 113–117.

- [Reinemann 2021] Reinemann, J. (2021): Entwicklung einer Systematik zur Validierung interaktiver Produkte in Augmented-Reality-Umgebungen in der Frühen Phase im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie
- [Reinemann et al. 2019] Reinemann, J.; Fahl, J.; Hirschter, T.; Albers, A. (2019): Augmented Reality in der Produktvalidierung: Potenziale und Grenzen in frühen Entwicklungsphasen. In: Beiträge zur Konferenz Entwerfen Entwickeln Erleben in Produktentwicklung und Design (EEE) 1, S. 33–50.
- [Reljić et al. 2019] Reljić, I.; Dunder, I.; Seljan, S. (2019): Photogrammetric 3D Scanning of Physical Objects: Tools and Workflow. In: TEM Journal 8, S. 383–388.
- [Ribeirinho et al. 2020] Ribeirinho, L.; Lopes, I.; Baiao, C. (2020): Joint Field Data Collection Simplified by the Use of Photogrammetry. In: António Gomes Correia, Joaquim Tinoco, Paulo Cortez und Luís Lamas (Hg.): Information Technology in Geo-Engineering. Cham: Springer International Publishing, S. 441–449.
- [Richter et al. 2014] Richter, L.; Lübke, J.; Nyhuis, P. (2014): Development of a Model for the Redesign of Plant Structures. In: Industrial and Manufacturing Engineering 11 (8), S. 3453–3456.
- [Rieke et al. 2021] Rieke, L.; Schäfer, S. F.; Hingst, L.; Hook, J.; Peter, N. (2021): Einsatz von BIM in der Fabrikplanung/Use of BIM in factory planning. In: Co-operative factory planning. Transformability through to the target oriented integration of process and building planning 111 (11-12), S. 881–886.
- [Rohweder et al. 2018] Rohweder, J. P.; Kasten, G.; Malzahn, D.; Piro, A.; Schmid, J. (2018): Informationsqualität - Definitionen, Dimensionen und Begriffe. In: Knut Hildebrand, Marcus Gebauer, Holger Hinrichs und Michael Mielke (Hg.): Daten- und Informationsqualität. Wiesbaden: Springer Fachmedien, S. 26–46.
- [Rönnecke 2009] Rönnecke, T. (2009): Ganzheitliche Produktionssysteme. In: Engelbert Westkämper und Erich Zahn (Hg.): Wandlungsfähige Produktionsunternehmen: Das Stuttgarter Unternehmensmodell. Berlin, Heidelberg: Springer (Springer eBook Collection. Business and Economics), S. 25–46.
- [Rößl 1990] Rößl, D. (1990): Die Entwicklung eines Bezugsrahmens und seine Stellung im Forschungsprozeß. In: Journal für Betriebswirtschaft (JfB) 40 (2), S. 99–110.
- [Rupp 2014] Rupp, C. (2014): Requirements-Engineering und -Management. Aus der Praxis von klassisch bis agil. 1., aktualisierte und erweiterte Auflage. München: Hanser (Hanser eLibrary).
- [Russo et al. 2019] Russo, M.; Giugliano, A. M.; Ascutti, M. (2019): Mobile Phone Imaging for CH Facade Modelling. In: ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-2/W17, S. 287–294.
- [Santise et al. 2017] Santise, M.; Thoeni, K.; Roncella, R.; Sloan, S. W.; Giacomini, A. (2017): Preliminary tests of a new low-cost photogrammetric system. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-2/W8, S. 229–236.
- [Schäfer et al. 2022a] Schäfer, S. F.; Gorke, N. T.; Cevirgen, C.; Park, Y.-B.; Nyhuis, P. (2022): Elemente der „Fabrik der Zukunft“. Teil 1: Digitale Fabrik, Industrie 4.0 und BIM. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 117 (1-2), S. 20–24.
- [Schäfer et al. 2022b] Schäfer, S. F.; Gorke, N. T.; Cevirgen, C.; Park, Y.-B.; Nyhuis, P. (2022): Elemente der „Fabrik der Zukunft“. Teil 2: Smart Plant - der Digitale Zwilling des Fabrikgesamtsystems. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 117 (3), S. 151–156.

- [Schäfer et al. 2022c] Schäfer, S. F.; Hingst, L.; Hook, J.; Rieke, L.; Nyhuis, P. (2022): Improving The Planning Quality Through Model-Based Factory Planning In BIM. In: *Journal of Production Systems and Logistics* 2, S. 1-15.
- [Schanz 1987] Schanz, G. (1987): Wissenschaftstheoretische Grundfragen der Führungsforschung. Allgemeines zur Wissenschaftstheorie. In: Alfred Kieser, Gerhard Reber und Rolf Wunderer (Hg.): *Handwörterbuch der Führung*. 2. Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel Verlag (Enzyklopädie der Betriebswirtschaftslehre, 10), S. 2189–2197.
- [Schenk et al. 2014] Schenk, M.; Wirth, S.; Müller, E. (2014): *Fabrikplanung und Fabrikbetrieb. Methoden für die wandlungsfähige, vernetzte und ressourceneffiziente Fabrik*. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- [Schindler 2019] Schindler, M. (2019): *System und Methode zur Planung von Produktionssystemen auf Basis der 3D-Digitalisierung bestehender Strukturen mit Farbinformation*. Dissertation. Universität Stuttgart. Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW).
- [Schlick et al. 2018] Schlick, C.; Bruder, R.; Luczak, H. (2018): *Arbeitswissenschaft*. 4. Aufl. 2018. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg (SpringerLink. Bücher).
- [Schmigalla 1995] Schmigalla, H. (1995): *Fabrikplanung. Begriffe und Zusammenhänge*. 1. Aufl. München: Hanser (REFA-Fachbuchreihe Betriebsorganisation).
- [Shellshear et al. 2015] Shellshear, E.; Berlin, R.; Carlson, J. S. (2015): Maximizing Smart Factory Systems by Incrementally Updating Point Clouds. In: *IEEE Computer Graphics and Applications* 35 (2), S. 62–69.
- [Sippl & Reinhart 2021] Sippl, F.; Reinhart, G. (2021): A Framework for Data-Based Change Impact Analysis in Manufacturing. In: *Procedia CIRP* 104, S. 247–252.
- [Spath et al. 2002] Spath, D.; Baumeister, M.; Rasch, D. (2002): Wandlungsfähigkeit und Planung von Fabriken. Ein Ansatz durch Fabriktypologisierung und unterstützenden Strukturbaukasten. In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 97 (1/2), S. 28–31.
- [Spath & Scholtz 2007] Spath, D.; Scholtz, O. (2007): Wandlungsfähigkeit für eine wirtschaftliche Montage in Deutschland. Aktuelle Erkenntnisse und anstehende Forschungsfragen. In: *Industrie-Management: Zeitschrift für Industrielle Geschäftsprozesse* 23 (2), S. 61–64.
- [Spyridis et al. 2019] Spyridis, P.; Hoepfner, M.; Gralla, M.; Lenz, L. T.; Weist, K. C. (2019): Lifecycle Design of Fastening Systems in Concrete Supported by BIM: Case Study Subsequent Assembly of an Industrial Robot. In: *Proceedings of the Creative Construction Conference 2019*. Creative Construction Conference 2019: Budapest University of Technology and Economics, S. 851–856.
- [Stachowiak 1973] Stachowiak, H. (1973): *Allgemeine Modelltheorie*. Wien [u.a.]: Springer.
- [Tan et al. 2021] Tan, C. H.; Yap, H. J.; Musa, S. N.; Chang, S. W.; Sivadas, C. S.; Hisaburi, A. S. et al. (2021): Augmented reality assisted facility layout digitization and planning. In: *J Mech Sci Technol* 35 (9), S. 4115–4123.
- [Tang et al. 2010] Tang, P.; Huber, D.; Akinci, B.; Lipman, R.; Lytle, A. (2010): Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques. In: *Automation in Construction* 19 (7), S. 829–843.
- [Tang et al. 2019] Tang, S.; Shelden, D. R.; Eastman, C. M.; Pishdad-Bozorgi, P.; Gao, X. (2019): A review of building information modeling (BIM) and the internet of things (IoT) devices integration: Present status and future trends. In: *Automation in Construction* 101, S. 127–139.

- [Terkaj et al. 2015] Terkaj, W.; Tolio, T.; Urgo, M. (2015): A virtual factory approach for in situ simulation to support production and maintenance planning. In: *CIRP Annals* 64 (1), S. 451–454.
- [Thomson et al. 2013] Thomson, C.; Apostolopoulos, G.; Backes, D.; Boehm, J. (2013): Mobile Laser Scanning for Indoor Modelling. In: *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences II-5/W2*, S. 289–293.
- [Tkachenko et al. 2022] Tkachenko, M.; Skriabin, N.; Zhuk, S. (2022): Labellmg. Online verfügbar unter <https://github.com/heartexlabs/labellmg>.
- [Tolmer 2020] Tolmer, C.-E. (2020): Improving the Use of BIM Using System Engineering for Infrastructure Projects. In: *International Journal of 3-D Information Modeling*, S. 230–247.
- [Tolmer & Castaing 2017] Tolmer, C.-E.; Castaing, C. (2017): Applying System and Requirement Engineering for Information Modeling in Infrastructure Projects. In: *Proceedings of the Joint Conference on Computing in Construction*, S. 329–336.
- [Tolmer et al. 2017] Tolmer, C.-E.; Castaing, C.; Diab, Y.; Morand, D. (2017): Adapting LOD definition to meet BIM uses requirements and data modeling for linear infrastructures projects: using system and requirement engineering. In: *Visualization in Engineering volume. 5 (1)*, S. 169.
- [Tomczak 1992] Tomczak, T. (1992): Forschungsmethoden in der Marketingwissenschaft - Ein Plädoyer für den qualitativen Forschungsansatz. In: *Marketing ZFP* 2, S. 77–87.
- [Töpfer 2012] Töpfer, A. (2012): Erfolgreich forschen. Ein Leitfaden für Bachelor-, Master-Studierende und Doktoranden. 3. Aufl. Wiesbaden: Springer Gabler (Springer-Lehrbuch).
- [Tran 2017] Tran, D. (2017): Raccoon Detector Dataset. Online verfügbar unter [https://github.com/datitran/raccoon\\_dataset](https://github.com/datitran/raccoon_dataset), zuletzt geprüft am 03.09.2022.
- [Tscharf 2018] Tscharf, A. (2018): Stand der Technik in der Tagbauvermessung. In: *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte* 163 (2), S. 57–63.
- [Tserng et al. 2014] Tserng, H.-P.; Ho, s.; Jan, S.-H. (2014): Developing BIM-assisted as-built schedule management system for general contractors. In: *Journal of Civil Engineering and Management* 20, S. 47–58.
- [Tuttas et al. 2014] Tuttas, S.; Braun, A.; Borrmann, A.; Stilla, U. (2014): Comparison of photogrammetric point clouds with BIM building elements for construction progress monitoring. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-3*, S. 341–345.
- [Tuttas et al. 2017] Tuttas, S.; Braun, A.; Borrmann, A.; Stilla, U. (2017): Acquisition and Consecutive Registration of Photogrammetric Point Clouds for Construction Progress Monitoring Using a 4D BIM. In: *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation* 85 (1), S. 3–15.
- [Tuttas 2017] Tuttas, S. A. (2017): Erfassung von Bauteilen durch photogrammetrische Punktwolken und Abgleich eines 4D-Bauwerkmodells zur Baufortschrittskontrolle. Dissertation. Technische Universität München. Ingenieur fakul-tät Bau Geo Umwelt.
- [Uhlemann et al. 2017] Uhlemann, T.; Lehmann, C.; Steinhilper, R. (2017): The Digital Twin: Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4.0. In: *Procedia CIRP* 61, S. 335–340.
- [Ulrich 1984] Ulrich, H. (1984): Management. Hrsg. von Thomas Dyllick u. Gilbert J. B. Probst. Unter Mitarbeit von Thomas Dyllick und Gilbert Probst. Bern & Stuttgart: Haupt (Schriftenreihe Unternehmung und Unternehmungsführung, 13).

- [Ulrich & Hill 1976a] Ulrich, P.; Hill, W. (1976): Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre (Teil II). In: Zeitschrift für Ausbildung und Hochschulkontakt 5 (8), S. 345–350.
- [Ulrich & Hill 1976b] Ulrich, P.; Hill, W. (1976): Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre (Teil I). In: WiST Wirtschaftswissenschaftliches Studium (7), S. 304–309.
- [Vajna et al. 2018] Vajna, S.; Weber, C.; Zeman, K.; Hehenberger, P.; Gerhard, D.; Wartzack, S. (2018): CAx für Ingenieure: Eine praxisbezogene Einführung. 3. Aufl. 2018. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- [van Nederveen & Tolman 1992] van Nederveen, G. A.; Tolman, F. P. (1992): Modelling multiple views on buildings. In: Automation in Construction 1 (3), S. 215–224.
- [VDI 2206 2004] VDI 2206, 2004: VDI 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme, VDI - Verein Deutscher Ingenieure.
- [VDI 2206 2021] VDI 2206, 2021: VDI 2206: Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme, VDI - Verein Deutscher Ingenieure.
- [VDI 2552-1 2020] VDI 2552-1, 2020: VDI 2552-1: Building Information Modeling - Blatt 1: Grundlagen, VDI - Verein Deutscher Ingenieure.
- [VDI 2552-11.2 2020] VDI 2552-11.2, 2020: VDI 2552-11.2: Building Information Modeling - Blatt 11.2: Informationsaustauschanforderungen - Schlitz- und Durchbruchplanung, VDI - Verein Deutscher Ingenieure.
- [VDI 2552-11.3 2020] VDI 2552-11.3, 2020: VDI 2552-11.3: Building Information Modeling - Blatt 11.3: Informationsaustauschanforderungen - Schalungs- und Gerüsttechnik (Ortbetonbauweise), VDI - Verein Deutscher Ingenieure.
- [VDI 2552-4 2020] VDI 2552-4, 2020: VDI 2552-4: Building Information Modeling - Blatt 4: Anforderungen an den Datenaustausch, VDI - Verein Deutscher Ingenieure.
- [VDI 2552-9 2020] VDI 2552-9, 2020: VDI 2552 - 9: Building Information Modeling - Blatt 9: Klassifikationssysteme, VDI - Verein Deutscher Ingenieure.
- [VDI 2634-2 2012] VDI 2634-2, 2012: VDI 2634-2: Optische 3D-Messsysteme - Blatt 2: Bildgebende Systeme mit flächenhafter Antastung, VDI - Verein Deutscher Ingenieure.
- [VDI 4499-2 2011] VDI 4499-2, 2011: VDI 4499-2: Digitale Fabrik - Blatt 2: Digitaler Fabrikbetrieb, VDI - Verein Deutscher Ingenieure.
- [VDI 4499-3 2016] VDI 4499-3, 2016: VDI 4499-3: Digitale Fabrik - Blatt 3: Datenmanagement und Systemarchitekturen, VDI - Verein Deutscher Ingenieure.
- [VDI 5200-1 2011] VDI 5200-1, 2011: VDI 5200-1: Fabrikplanung - Blatt 1: Planungsvorgehen, VDI - Verein Deutscher Ingenieure.
- [Volk et al. 2015] Volk, R.; Sevilimis, N.; Schultmann, F. (2015): Deconstruction project planning based on automatic acquisition and reconstruction of building information for existing buildings. In: J Gibberd (Hg.): Proceedings of SASBE2015, Smart and Sustainable Built Environments Conference. Pretoria, South Africa, 09.11.-11.11.2015, S. 47–56.
- [Volk et al. 2014] Volk, R.; Stengel, J.; Schultmann, F. (2014): Building Information Modeling (BIM) for existing buildings — Literature review and future needs. In: Automation in Construction 38, S. 109–127.
- [Voutilainen et al. 2015] Voutilainen, J.; Salonen, J.; Mikkonen, T. (2015): On the Design of a Responsive User Interface for a Multi-device Web Service. In: 2015 2nd ACM International Conference on Mobile Software Engineering and Systems. 2015 2nd ACM International Conference on Mobile Software Engineering and Systems, S. 60–63.

- [Wand & Wang 1996] Wand, Y.; Wang, R. Y. (1996): Anchoring data quality dimensions in ontological foundations. In: *Commun. ACM* 39 (11), S. 86–95.
- [Wang et al. 2019] Wang, Q.; Tan, Y.; Mei, Z. (2019): Computational Methods of Acquisition and Processing of 3D Point Cloud Data for Construction Applications. In: *Archives of Computational Methods in Engineering* 27, S. 479–499.
- [Weick 2007] Weick, K. E. (2007): *Der Prozeß des Organisierens*. Unter Mitarbeit von Gerhard Hauck. 4. Aufl. Frankfurt am Main: Suhrkamp (Suhrkamp-Taschenbuch Wissenschaft, 1194).
- [Weskämper & Niemann 2009] Weskämper, E.; Niemann, J. (2009): Digitale Produktion. Herausforderung und Nutzen. In: Hans-Jörg Bullinger, Dieter Spath, Hans-Jürgen Warnecke und Engelbert Westkämper (Hg.): *Handbuch Unternehmensorganisation. Strategien, Planung, Umsetzung*. 3., neu bearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 515–529.
- [Westkämper et al. 1997] Westkämper, E.; Briel, R.; März, L. (1997): Planung in dynamischen Produktionssystemen. Wandlungsfähigkeit als Wettbewerbsfaktor. In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 92 (12), S. 639–642.
- [Westkämper 2006] Westkämper, E. (2006): Factory Transformability: Adapting the Structures of Manufacturing. In: Anatoli I. Dashchenko (Hg.): *Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 371–381.
- [Westkämper 2014] Westkämper, E. (2014): *Towards the re-industrialization of Europe: a concept for manufacturing 2030*. Berlin, Heidelberg [u.a.]: Springer (Manufuture-EU).
- [Wiedemann 2004] Wiedemann, A. (2004): *Handbuch Bauwerksvermessung. Geodäsie, Photogrammetrie, Laserscanning*. Basel: Birkhäuser (Bauhandbuch).
- [Wiendahl et al. 2014] Wiendahl, H.-P.; Reichardt, J.; Nyhuis, P. (2014): *Handbuch Fabrikplanung. Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten*. 2. Aufl., [elektronische Ressource]. München: Hanser.
- [Wirth et al. 1999] Wirth, S.; Enderlein, H.; Förster, A.; Petermann, J. (1999): Zukunftsweisende Unternehmens- und Fabrikkonzepte für KMU. In: *Vortragsband zur Fachtagung: Zukunftsweisende Unternehmens- und Fabrikkonzepte*. Chemnitz (Vortragsband zur Fachtagung: Zukunftsweisende Unternehmens- und Fabrikkonzepte), S. 34–51.
- [Wirth et al. 2000] Wirth, S.; Enderlein, H.; Hildebrand, T. (2000): Visionen zur wandlungsfähigen Fabrik. Ergebnisse der Vordringlichen Aktion "Flexible, temporäre Fabrik". In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 95, S. 456–462.
- [Witte et al. 2020] Witte, B.; Sparla, P.; Blankenbach, J. (2020): *Vermessungskunde für das Bauwesen mit Grundlagen des Building Information Modeling (BIM) und der Statistik*. 9., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin: Wichmann.
- [Wu et al. 2022] Wu, B.; Zhao, W.; Hu, H.; Liu, Y.; Lv, J. (2022): Conceptual Design of Intelligent Manufacturing Equipment Based on a Multi-source Heterogeneous Requirement Mapping Method. In: *IFAC-PapersOnline* 55 (2), S. 475–480.
- [Wulf 2011] Wulf, S. (2011): *Bewertung des Einflusses von Produkt- und Technologieveränderungen auf die Fabrik*. Dissertation. Leibniz Universität Hannover.
- [Würthele 2003] Würthele, V. G. (2003): *Datenqualitätsmetrik für Informationsprozesse: Datenqualitätsmanagement mittels ganzheitlicher Messung der Datenqualität*. Dissertation. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.



- [Xinyu & Anna 2019] Xinyu, H.; Anna, Z. (2019): Research on Fabricated Architecture based on BIM Technology. In: Proceedings of the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 310, S. 1–5.
- [Yang et al. 2020] Yang, X.; Grussenmeyer, P.; Koehl, M.; Macher, H.; Murdiyoso, A.; Landes, T. (2020): Review of built heritage modelling: Integration of HBIM and other information techniques. In: Journal of Cultural Heritage (46), S. 350–360.
- [Yilmaz et al. 2019] Yilmaz, G.; Akcamete, A.; Demirors, O. (2019): A reference model for BIM capability assessments. In: Automation in Construction 101, S. 245–263.
- [Zäh et al. 2004] Zäh, M. F.; Fusch, T.; Neise, P. (2004): Integrative Fabrikplanung mit virtuellen Produktionsmodellen. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 99 (1-2), S. 54–57.
- [Zhang & Arditi 2020] Zhang, C.; Arditi, D. (2020): Advanced Progress Control of Infrastructure Construction Projects Using Terrestrial Laser Scanning Technology. In: Infrastructures 5 (83), S. 1–18.
- [Zhou et al. 2020] Zhou, K.; Lindenbergh, R.; Gorte, B.; Zlatanova, S. (2020): LiDAR-guided dense matching for detecting changes and updating of buildings in Airborne LiDAR data. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 162, S. 200–213.
- [Zürn 2010] Zürn, M. (2010): Referenzmodell für die Fabrikplanung auf Basis von Quality Gates. Dissertation. Universität Stuttgart.

## Anhang

### Anhang A Ergebnisse der Experteninterviews

Tab. A.1: Interviewpartner

Interview-partner	Branche	Position	Kompetenz	Interview durchgeführt am:
(1) Anonymisiert	Variantenreiche Serienproduktion	Leiter Facility Management Strategy, ehemals Fabrikplanung	Langjährige Erfahrung in Fabrikplanung; Erfahrung in Umbaumaßnahmen	11.06.2019
(2) Anonymisiert	Planungsbüro	Projektingenieur	Erfahrung in Planung von Umbaumaßnahmen in Fabriken im Gebiet Gebäudetechnik	09.04.2019
(3) Anonymisiert	Softwareentwicklung	Co-Founder und CEO	Erfahrung in der Entwicklung von Indoorviewern und Punktwolkenverarbeitung	28.02.2019
(4) Anonymisiert	Vermessungsingenieur Büro	Geschäftsführer	Erfahrung in der Bestandserfassung von Fabrikanlagen via Laserscan	28.02.2019
(5) Anonymisiert	Softwareentwicklung	Technical Channel Development	Erfahrung im Einsatz von BIM in der Praxis	27.08.2019

Tab. A.2: Interviewfragen

Nr.	Frage
1	Wann kommt es in ihrem Unternehmen zu einem Umbau?
2	Wie läuft momentan bei Ihnen der Prozess (oder der Prozess den Sie unterstützen) eines Umbaus ab, bei dem das Gebäude betroffen ist?
2a	Auf welche Planungsunterlagen greifen Sie zu, die das Gebäude betreffen?
2b	Wird ein digitales Gebäudemodell (in jeglicher Form) für einen Umbau genutzt?
3	Welche Informationen wären für Sie aus einem digitalen Gebäudemodell relevant?
4	Wie häufig wird bei Ihnen umgebaut? (Das Gebäude ist betroffen)
5	Sehen Sie bei der permanenten Verfügbarkeit von aktuellen Gebäudedaten in Form eines digitalen Gebäudemodells bei Umbauarbeiten einen Mehrwert?
6	Haben Sie Anmerkungen, Hinweise oder Bedenken zu der Methode?



Abb. A.1: Interviewvorgehen

Tab. A.3: Interviewergebnisse

Nr. Frage	Nr. Interview-partner	Antwort
1	1	Bei Produktänderungen
1	2	Umstrukturierung (beim Kunden), Neue Produktionslinie (beim Kunden)
1	3	-
1	4	Anpassung/ Änderung der Produktionslinie
1	5	Neues Produkt: Start of Production (beim Kunden)
2	1	Sichten von Bestandsplänen und Durchführung von Aufnahmen vor Ort
2	2	Mehrere Gewerke werden parallel bearbeit
2	3	Aufnahmen vor Ort werden erstellt
2	4	Aufnahmen vor Ort werden erstellt
2	5	Sichten von Bestandsplänen oder vor Ort Aufnahmen (Laserscans)
2a	1	Bestandspläne und Vor-Ort-Foto-Aufnahmen
2a	2	Bestandspläne und Vor-Ort-Foto-Aufnahmen
2a	3	Gebäudes scans, 360-Grad-Panoramafotos
2a	4	Gebäudes scans
2a	5	2D Planungen, Laserscans
2b	1	Nein, BIM erst im Pilotstatus
2b	2	Nein
2b	3	Laserscans in Verbindung mit 360-Grad Panoramafotos
2b	4	Laserscans in Verbindung mit 360-Grad Panoramafotos
2b	5	Laserscans und BIM-Modelle
3	1	Geometrie/ CAD-Daten
3	2	Geometrie und Bauteilinformationen
3	3	-
3	4	-
3	5	Statische Informationen (Baustatik), Versorgungsleitungen
4	1	jedes Jahr, Tendenz steigend
4	2	-
4	3	-
4	4	Unterschiedlich
4	5	Unterschiedlich, sehr häufig bis häufig (bezogen auf Kunden mit denen Kontakt besteht)
5	1	Ja, man hat heutzutage keine Zeit mehr jedesmal neue Planungsdaten ad-hoc zu erstellen
5	2	Ja, einfachere Datenverfügbarkeit
5	3	-
5	4	Ja, die Datenqualität von Laserscans und 360-Grad Panoramen ist für die meisten Anwendungsfälle ausreichend (Dienstleistersicht)
5	5	Ja, Laserscans beinhalten viele relevante Informationen
6	1	Zusätzlich beleuchten, welche Auswirkungen das auf die HOAI Phasen hat
6	2	Nein
6	3	Mittlerweile ist für eine regelmäßige Aktualisierung von digitalen Gebäudemodellen die Kompaktheit und einfache Bedienung der Hardware sehr wichtig
6	4	Der Trend geht hin zur partiellen Modellierung: Die komplette Nachmodellierung einer Fabrik mit BIM ist zu zeitaufwändig.
6	5	Nein

## Anhang B Ergebnisse des Workshops

Tab. B.1: Workshopteilnehmer

Workshop- teilnehmer	Branche/ Unternehmen s-art	Position	Kompetenz	Durch- geführt am:
(1) Anonymisiert	OEM	Leiter Facility Management Strategy, ehemals Fabrikplanung	Langjährige Erfahrung in Fabrikplanung; Erfahrung in Umbaumaßnahmen	18.12.2017
(2) Anonymisiert	OEM	Projektingenieur	Erfahrung in Planung von FM- Prozessen und Dienstleistungen	18.12.2017
(3) Anonymisiert	OEM	Projektingenieur	Erfahrung in Planung von FM- Prozessen und Dienstleistungen	18.12.2017
(4) Anonymisiert	OEM	Strategiearbeit, Innovationsmanagement	Erfahrung in der Bewertung von innovativen Technologien	18.12.2017
(5) Anonymisiert	OEM	Assistent der Geschäftsführung	Erfahrung mit Entwicklung und Nachhaltigkeitsthemen	18.12.2017
(6) Anonymisiert	OEM	Objektmanager	Erfahrung in Planung von FM- Prozessen und Dienstleistungen	18.12.2017
(7) Anonymisiert	OEM	Gebäudelebenszyklus Manager	Erfahrung mit Gebäudemanagement und Nachhaltigkeitsthemen	18.12.2017
(8) Anonymisiert	OEM	Meister	Gebäudetechnik	18.12.2017
(9) Anonymisiert	Beratung	Berater	Gebäudetechnik	18.12.2017
(10) Anonymisiert	Dienstleister	Leiter digitale Transformation	Technisches Facilitymanagement	18.12.2017
(11) Anonymisiert	Dienstleister	Niederlassungsleiter	Technisches Facilitymanagement	18.12.2017
(12) Anonymisiert	Forschung	Wissenschaftlicher Mitarbeiter	Erfahrung im Einsatz von BIM und Visualisierungstechnik	18.12.2017

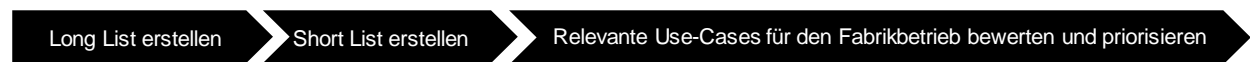


Abb. B.1: Workshopvorgehen

Tab. B.2: Workshopergebnisse

Ranking	Use Case	Beschreibung
1 (9)*	Bedarfsgeregelte Services	Sensorbasierte Bereitstellung von Gebäudeservices.
2 (8)	Zyklische Bauteilprüfung	Bauteilprüfung über das 3D-Gebäudemodell (Auftragsgenerierung, Abfrage von Informationen, Ablage der Dokumentation) ► Closed Loop, Medienbruchfrei.
3 (7)	Aktualisierung und Pflege des digitalen Gebäudemodells	Gewährleistung von aktuellen geometrischen Daten in der "Single source of truth". Aktualisierung von Punktwolken oder BIM-Modellen des Gebäudes.
3 (7)	Data Analytics	Big Data Analyse in der Gebäudetechnik durchzuführen und die Nachvollziehbarkeit der Vorgänge durch den Nutzer zu gewährleisten.
4 (5)	Interaktionen mit Raumfunktionen	Alle Raumfunktionen (Beleuchtung, Heizung, Kühlung, Fenster, Rollos...) werden über das 3D-Gebäudemodell gesteuert und überwacht. Die Steuerung ist außerdem durch Spracheingabe möglich.
5 (3)	Modellierung des Bestands (Scan-to-BIM)	Bestände werden automatisiert digital erzeugt.
6 (2)	Predictive Analytics	3D-Gebäudemodell kann durch KI Nutzerverhalten vorhersehen und Vorgänge
7 (1)	Sicherheit- und Zugänglichkeitsmanagement	Unterstützung von Zugangsauthentifizierungen durch das 3D-Gebäudemodell. Digitale Personenidentifizierung. Abbildung anwesender Personen im Gebäude.
7 (1)	Signaletik	Steuerung von Personenströmen. Indoornavigation.
7 (1)	Abnahme und Inbetriebnahmemanagement	Abnahme von Einrichtungen kann im 3D-Gebäudemodell dokumentiert werden. Notwendige Schritte zur erfolgreichen Inbetriebnahme können durch das 3D-Modell abgerufen werden.
8 (0)	Umzugsplanung	Darstellung der Flächenbelegung und Szenariovergleich.
8 (0)	Virtuelle Brandschutzbegehung	Brandschutzbestimmungen werden im 3D-Gebäudemodell hinterlegt und bei Veränderungen neu überprüft.
8 (0)	Resilienz und Wiederanlaufsznarien	Das 3D-Gebäudemodell unterstützt wiederkehrende Prozesse im Gebäude und bietet die Möglichkeit diese anzustoßen bzw. zu steuern.

\* (9)=Anzahl der von den Workshopteilnehmern erhaltenen Punkte bei der Priorisierung der Use Cases.

## Anhang C Literaturanalyse zur Änderungsdetektion in Fabriken

In der Literaturdatenbank Scopus konnten am 06.09.2022 unter dem Searchstring TITLE-ABS-KEY („geometric” AND “change detection” AND “factory”) keine Veröffentlichungen gefunden werden, welche die geometrische Änderungsdetektion in Fabriken thematisieren.

Unter dem Searchstring TITLE-ABS-KEY („geometric” AND „change“ AND „detection” AND “factory”) wurden drei Veröffentlichungen identifiziert, die jedoch ebenfalls keine geometrische Änderungsdetektion in Fabriken thematisieren.

Tab. C.1: Ergebnisse der Literaturanalyse TITLE-ABS-KEY („geometric” AND „change“ AND „detection” AND “factory”)

No.	Jahr	Autoren	Titel	Quellentitel
1	2021	Wenlong L., Huaqing Z., Junchi Y.	Online extrinsic camera calibration based on high-definition map matching on public roadway	Journal of Image and Graphics
2	2021	Hu G., Long C., Hu L., Chen W., Jia G.	Circulating lead modifies hexavalent chromium-induced genetic damage in a chromate-exposed population: An epidemiological study	Science of the Total Environment
3	2014	Zhong, L., Zhu, S., Bai, Y., ...Liu, J., Zhu, B.	Early changes in renal injury parameters and their influencing factors in workers exposed to mercury	Chinese Journal of Industrial Hygiene and occupational diseases

Anhang D Planungsmodule

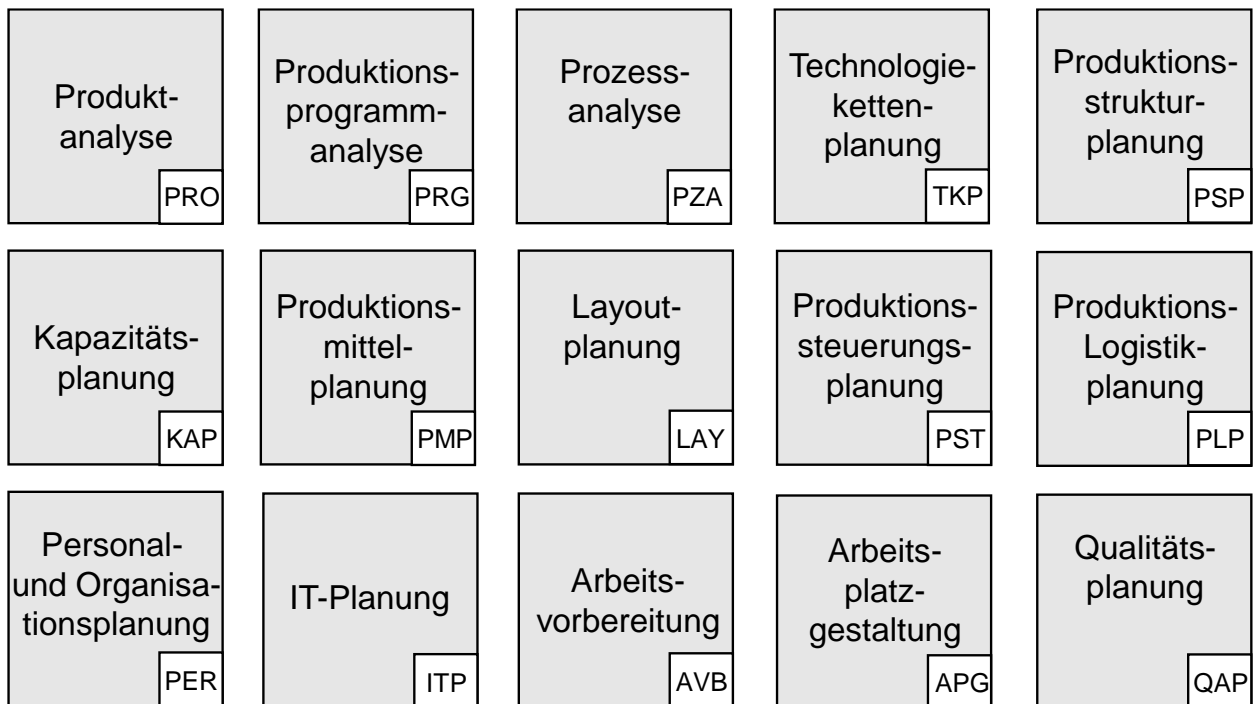


Abb. D.1: Übersicht der Planungsmodule der Produktionssystemplanung in Anlehnung an [Meckelnborg 2015, S. 111]



Abb. D.2: Übersicht der Transfer-Planungsmodule in Anlehnung an [Meckelnborg 2015, S. 115]

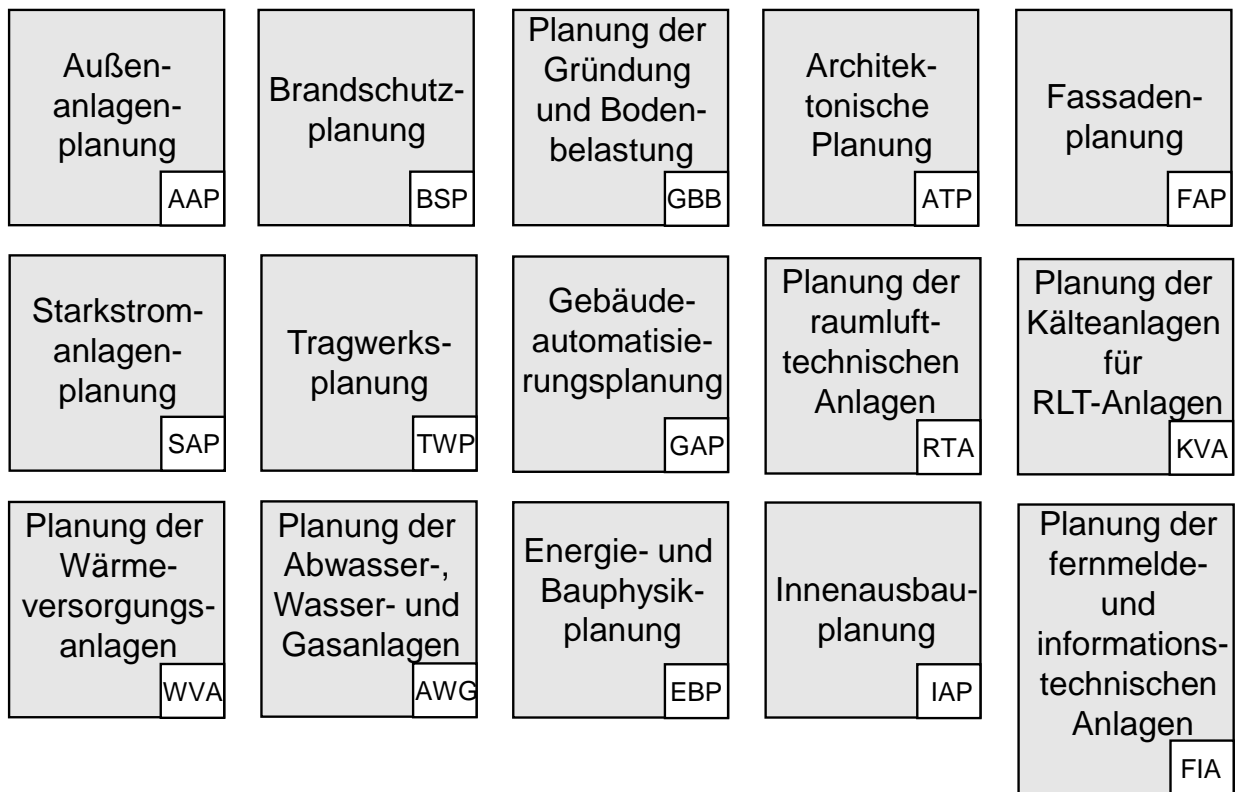


Abb. D.3: Übersicht der Planungsmodule der Industriebauplanung in Anlehnung an [Meckelnborg 2015, S. 115]



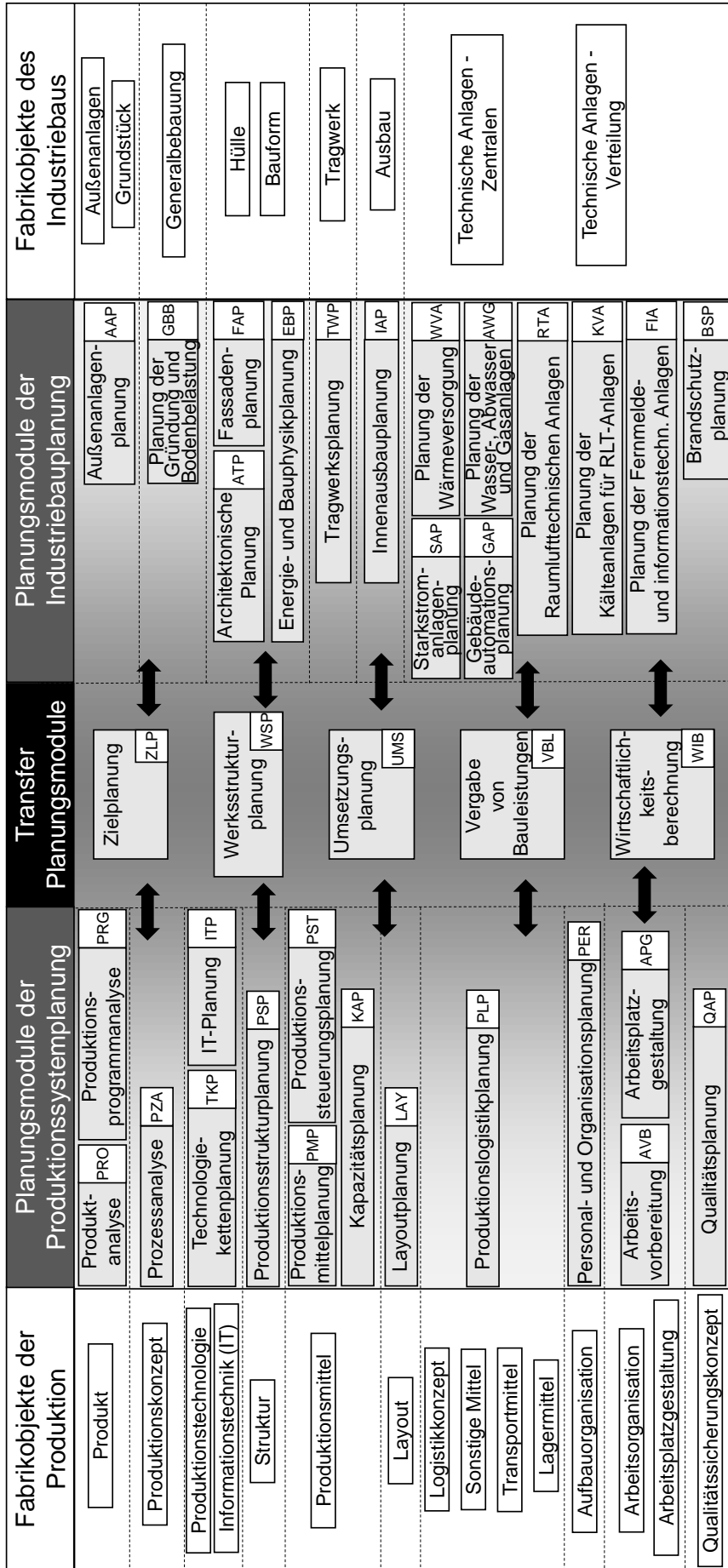


Abb. D.4: Modell der Interdependenzen – Inhaltliche Übersicht

# Anhang E Normenübersicht

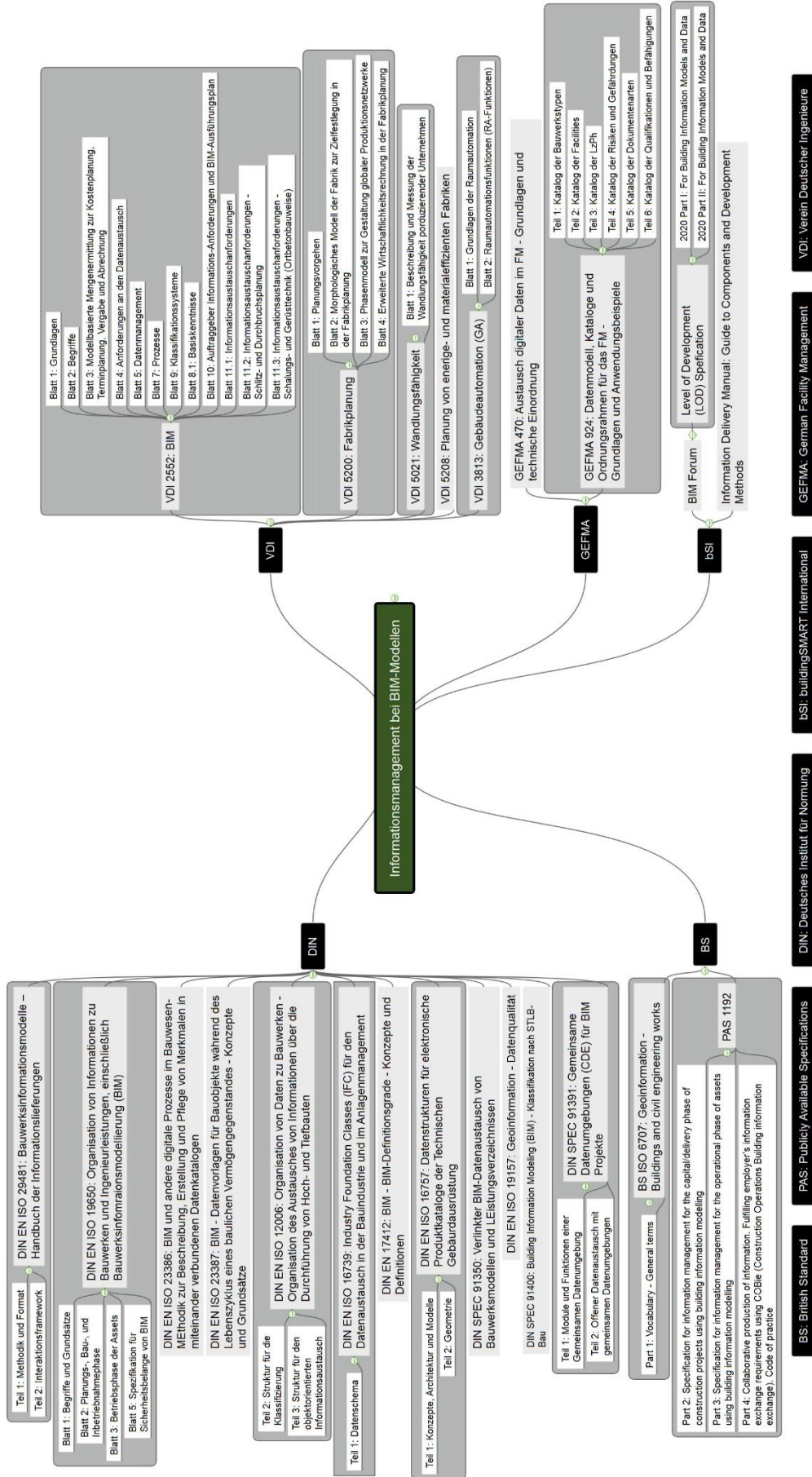
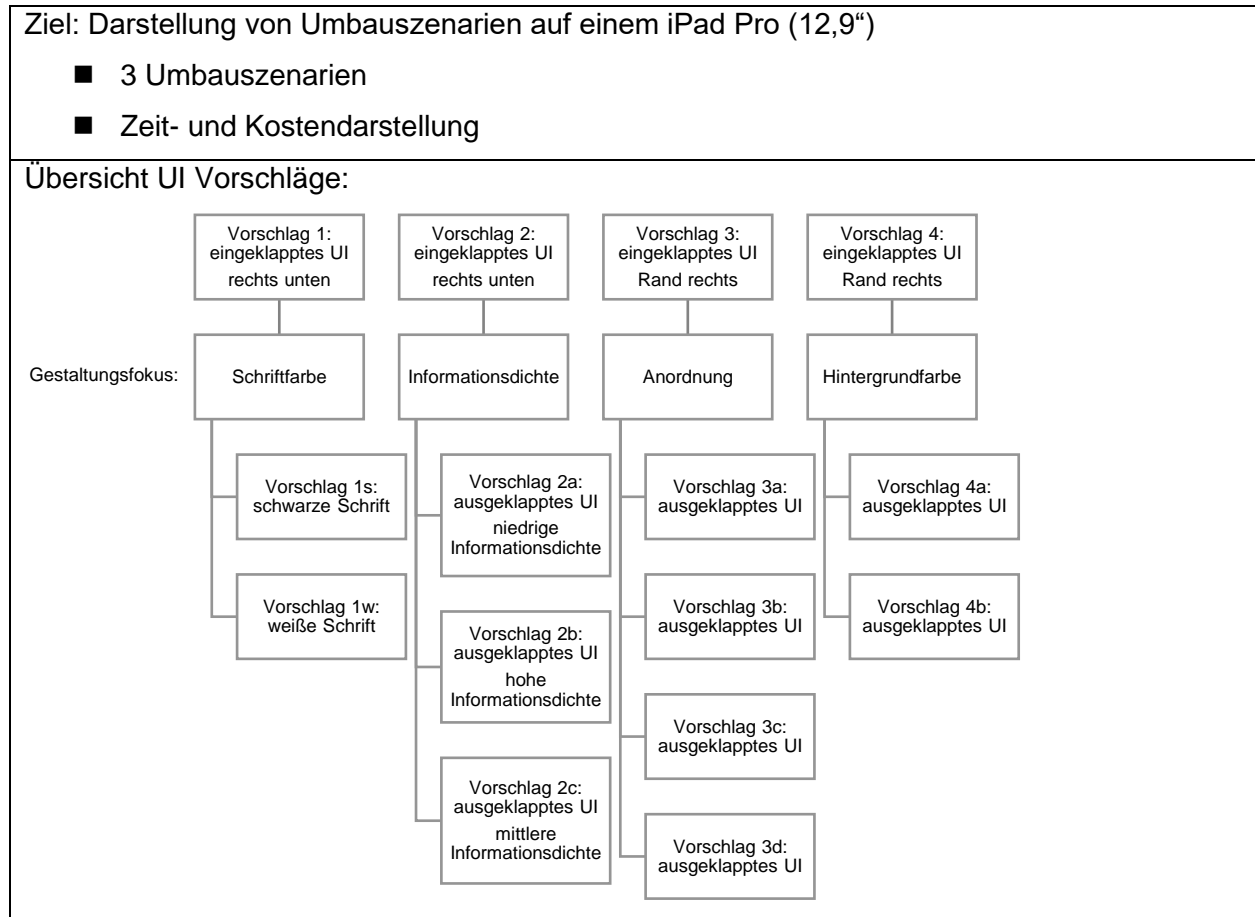


Abb. E. 1: Normenübersicht zum Informationsmanagement bei BIM-Modellen

Spezifikation für die Lieferungen von digitalen Modellinhalten															
Anforderungsliste															
KG	BIM-Objekt		Stockwerk	Raum/ Stützenraster	Standard/ Koordinaten	Zugehörige Informationen (zum BIM-Objekt)	Dringlichkeit	Informations- anforderer	Austauschformat		Zeitpunkt des Datenaustauschs	Vorgaben zur Erstellung			
	Modell-Element								Daten-Format	Anwendung und Version		Verantwortlicher	Art des Gebäudemodells	Level of Development (LOD)	
300	Bauwerk - Baukonstruktionen Außenwände														
	Tragende Außenwände														
	Nichttragende Außenwände														
	Außenstützen														
	Außenwandöffnungen														
	Außenwandbekleidungen, außen														
	Außenwandbekleidungen, innen														
	Innenwände														
	Tragende Innenwände														
	Nichttragende Innenwände														

Tab. E.2: Spezifikation für die Lieferung von digitalen Modellinhalten

Tab. F.1: Übersicht der Augmented Reality User Interface Vorschläge (Paper-Mock-Up)



Tab. F.2: Umfragebogen als Paper-UI-Mock-Up

User Interface Vorschlag 1 (Schriftfarbe), eingeklapptes UI



User Interface Vorschlag 1 (Schriftfarbe), ausgeklapptes UI mit weißer Schrift



User Interface Vorschlag 2 (Informationsdichte), eingeklapptes UI



User Interface Vorschlag 2a (Informationsdichte), ausgeklapptes UI



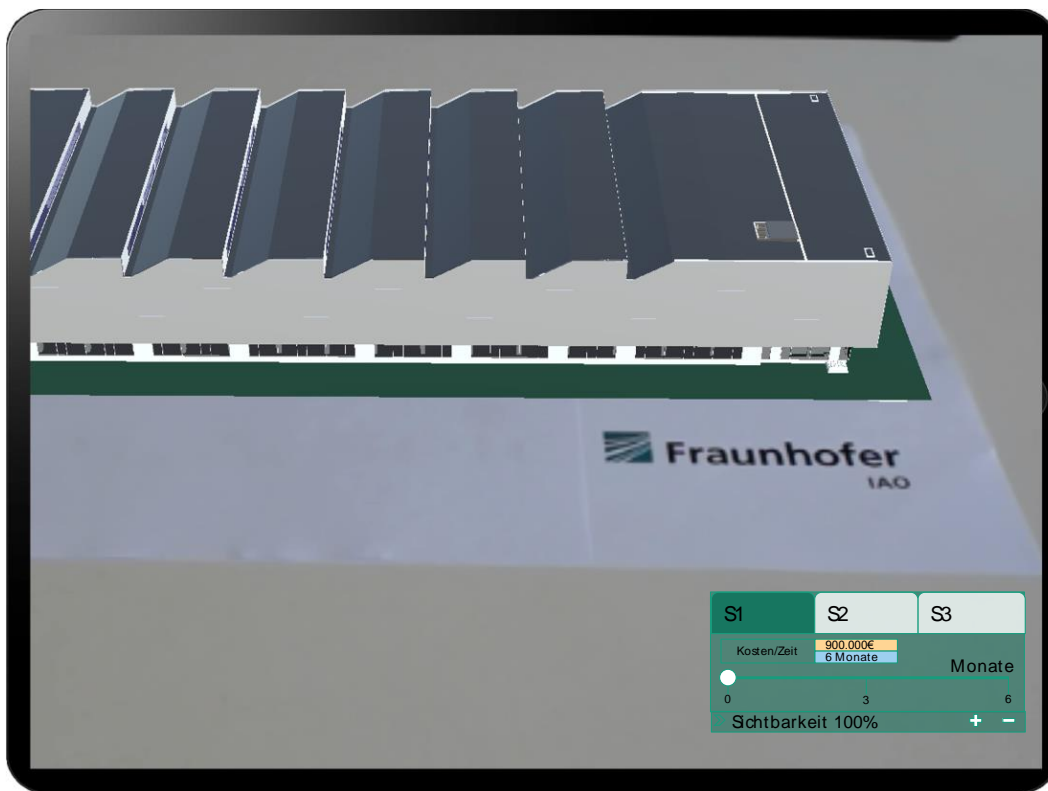
User Interface Vorschlag 2b (Informationsdichte), ausgeklapptes UI



User Interface Vorschlag 2c (Informationsdichte), eingeklapptes UI

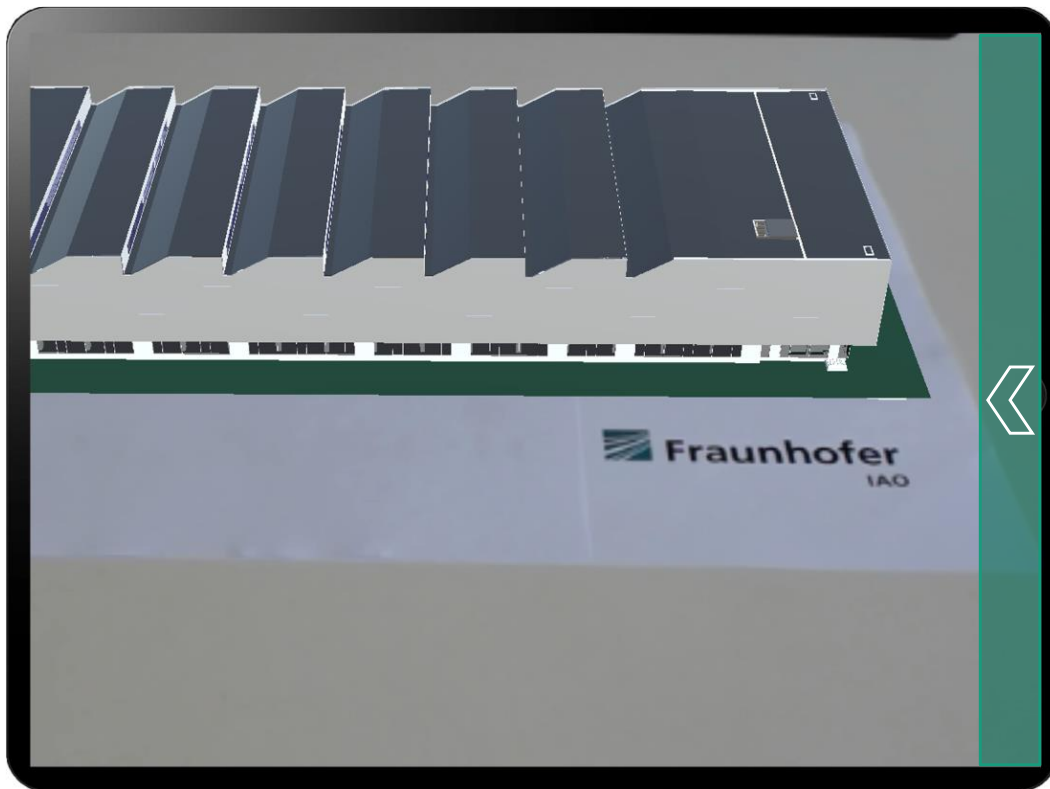


User Interface Vorschlag 2c (Informationsdichte), ausgeklapptes UI

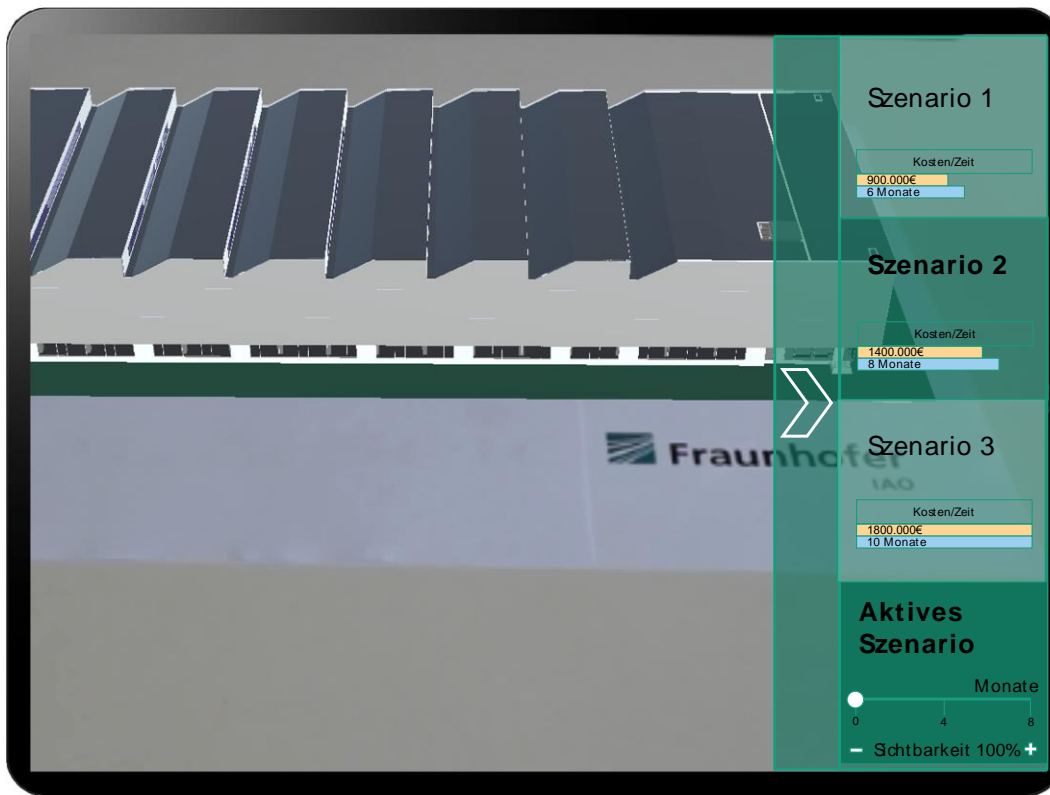




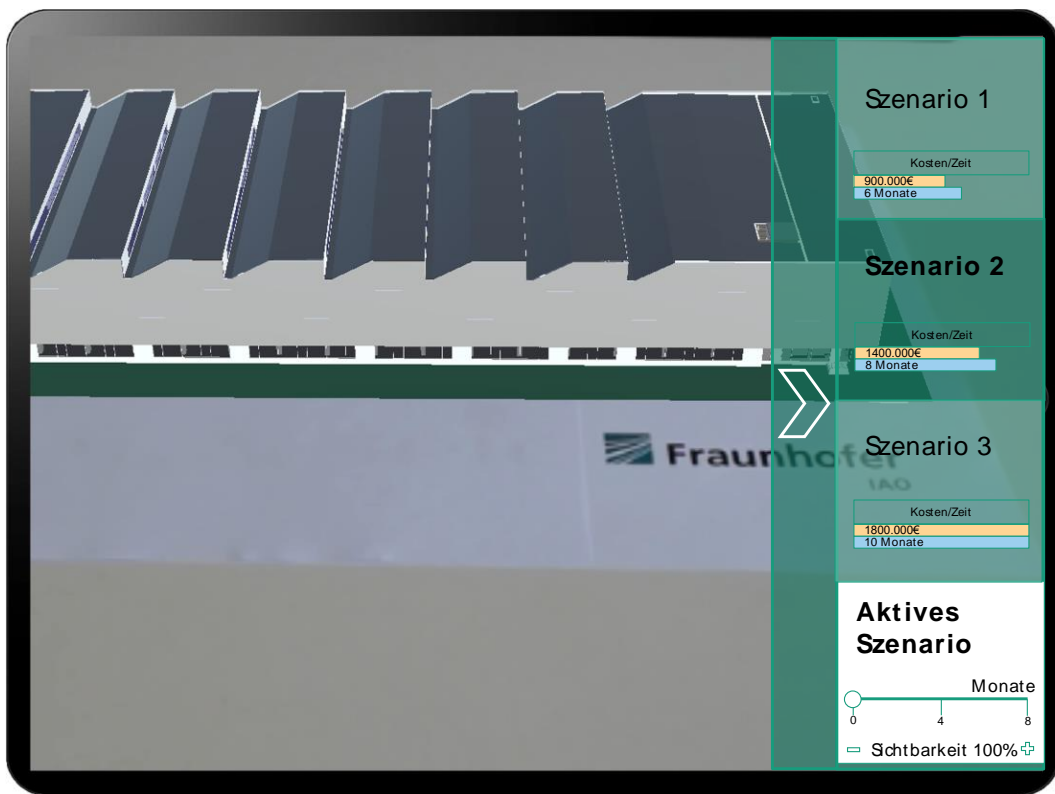
User Interface Vorschlag 3 (Anordnung), eingeklapptes UI



User Interface Vorschlag 3a (Anordnung), ausgeklapptes UI



User Interface Vorschlag 3b (Anordnung), ausgeklapptes UI



User Interface Vorschlag 3c (Anordnung), ausgeklapptes UI



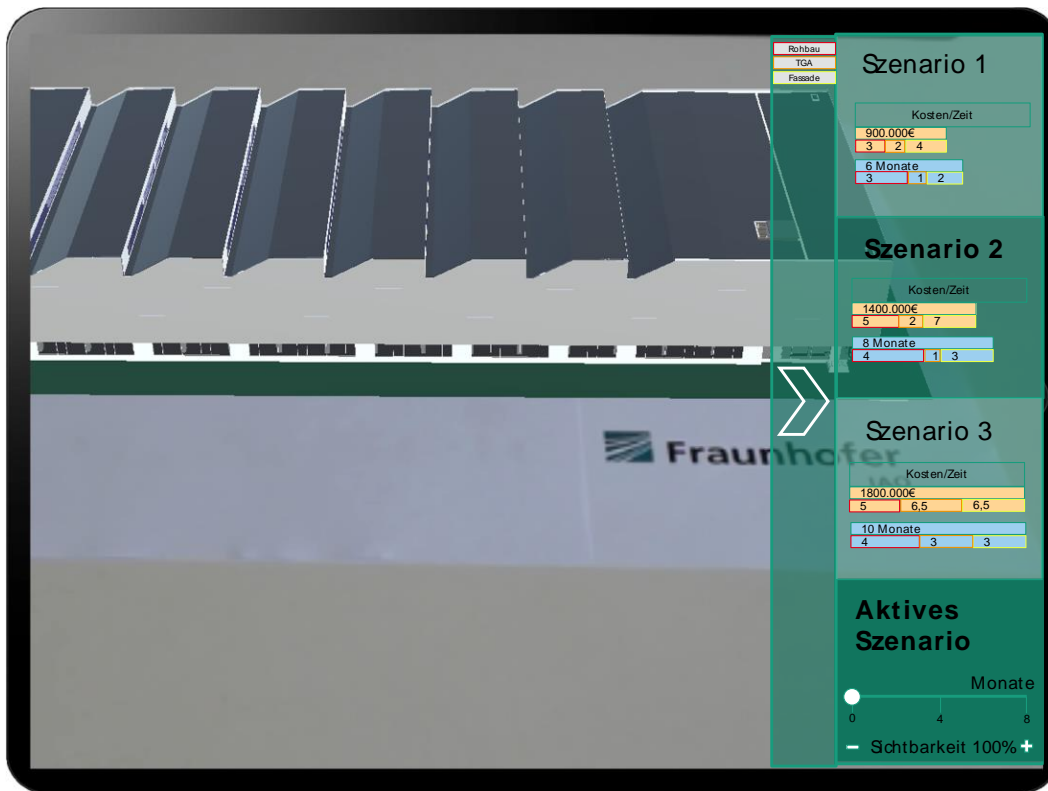
User Interface Vorschlag 3d (Anordnung), ausgeklapptes UI



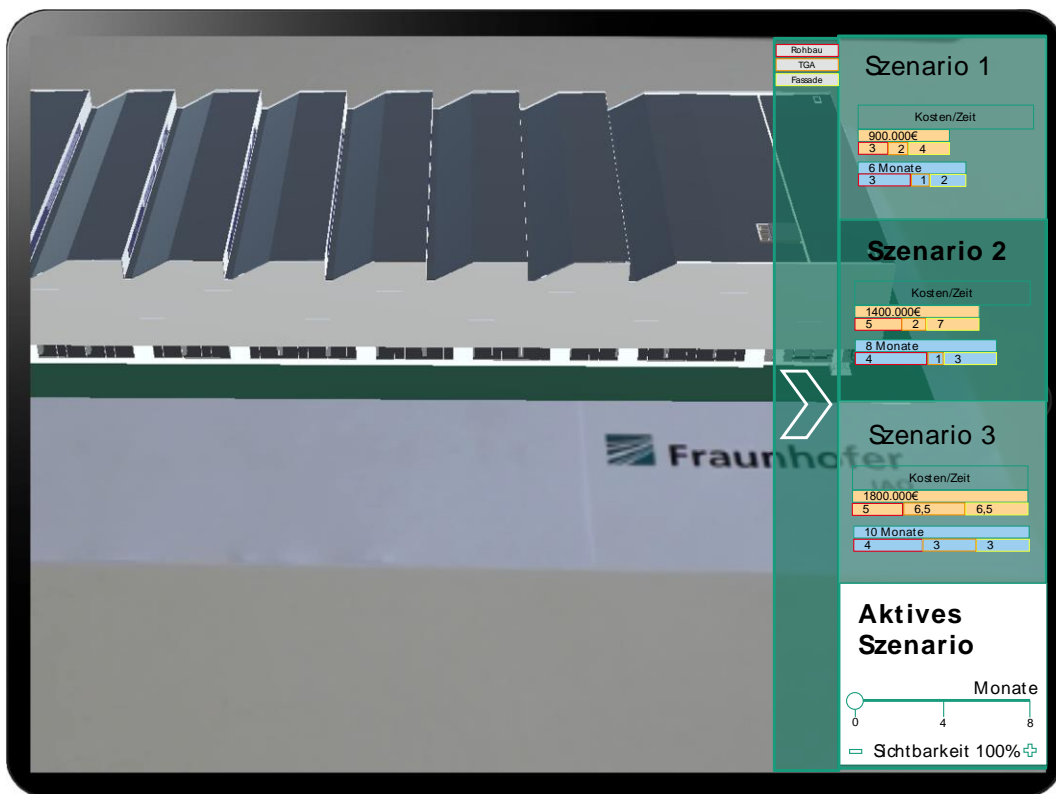
User Interface Vorschlag 4 (Hintergrundfarbe), eingeklapptes UI



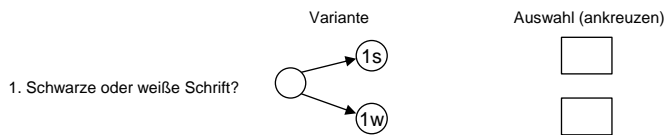
User Interface Vorschlag 4a (Hintergrundfarbe), ausgeklapptes UI



User Interface Vorschlag 4b (Hintergrundfarbe), ausgeklapptes UI



Bewertung UI Vorschläge:



Variante	Sehr schlecht	schlecht	mittel	Gut	Sehr gut
2a					
2b					
2c					
3a					
3b					
3c					
3d					
4a					
4b					

(Gesamtwertung hinsichtlich: Übersichtlichkeit, Informationsdarstellung, Informationsmenge, Field of view)

→ Eigene Vorschläge? → Skizzenblatt

Möglichkeit für eigene Vorschläge des UI (Skizze):

Eigene Vorschläge (Skizze)

Tab. F.3: Ergebnis der UI-Bewertung

Variante	sehr schlecht (Punkte: 1)	schlecht (Punkte: 2)	mittel (Punkte: 3)	gut (Punkte: 4)	sehr gut (Punkte: 5)	Mittelwert	Ranking
2a		2	4	5	4	3,7	1
2b	2	3	4	5	1	3,0	5
2c	1	2	5	5	2	3,3	2
3a		5	5	5		3,0	5
3b	1	1	9	3	1	3,1	4
3c		5	8		2	2,9	6
3d		2	8	5		3,2	3
4a		2	9	3	1	3,2	3
4b		5	4	5	1	3,1	4

Hinsichtlich der Schriftfarbe haben sich die Umfrageteilnehmer für die weiße Schrift mit 9 zu 6 Stimmen ausgesprochen. Bei der UI-Bewertung hat die Variante 2a mit schwarzer Schriftfarbe am besten abgeschnitten (vgl. Tab. F.3). Daher wird in der UI-Entwicklung sofern möglich eine schwarze Schriftfarbe verwendet.

		Unity 3D	Unreal Engine	CryEngine
Auswahlkriterien	Unterstützte Plattformen: iOS und Android	●	●	◐
	Benutzerfreundlichkeit	●	◐	◐
	Geeignet für Augmented Reality	●	●	◐
	Verarbeitbare Dateiformate	●	●	◐

○ Nicht erfüllt   ◐ Kaum erfüllt   ◑ Teilweise erfüllt   ● Erfüllt

Abb. F.1: Vergleich der Entwicklungsumgebungen

		Marker-basiertes Tracking			Markerloses Tracking			GPS/GNSS unterstütztes Tracking	
		AR Kit	Vuforia	AR Core	Vuforia	AR Kit	AR Core	AR Foundation	Azure Spatial Anchors
Auswahlkriterien	Stabilität	●	●	●	●	●	●	●	◐
	Integration in Entwicklungsumgebung	◐	●	◐	●	◐	◐	●	◐
	Flexibilität bei Veränderungen	◐	●	◐	●	◐	◐	●	◐
	Genauigkeit der Ausrichtung	●	●	●	◐	●	◐	◐	◐

○ Nicht erfüllt   ◐ Kaum erfüllt   ◑ Teilweise erfüllt   ● Erfüllt

GPS: Global Positioning System  
GNSS: Global Navigation Satellite System

Abb. F.2: Vergleich der AR-Frameworks für das Tracking

		iPad Pro (12,9 3. Gen)	Samsung Galaxy Tab S7	Samsung Galaxy Tab S7+
Auswahlkriterien	Gewicht	◐	●	●
	Kamera	●	●	●
	Prozessorgeschwindigkeit/Arbeitsspeicher	●	●	●
	Display (Auflösung + Helligkeit)	●	◐	◐
	Akkulaufzeit	●	●	●

Abb. F.3: Vergleich von Tablets

Tab. G.1: Für Berechnungen verwendeter PC

Verwendeter PC	
Kategorie	Eigenschaft
CPU	Intel® Core™ i7-6700 CPU 4 Kerne @ 3.40GHz
RAM	32 GB
GPU	NVIDIA GeForce GTX980Ti
Betriebssystem	Windows 10 Pro Version 1809 64 Bit

Tab. G.2: Kameraeinstellung während der Aufnahme
















Aufnahmegerät	Datensatz	Kameraeinstellungen			Anzahl Fotos
		ISO	F Stop	Shutterspeed	
D810 D1	D1	800	5,6	1/125 sek	224
D810 D2	D2	800	5,6	1/125 sek	237
D810 D3	D3	800	5,6	1/125 sek	209
iPhone 6 D1	D1	250	2,2	1/125 sek	297
iPhone 6 D2	D2	250	2,2	1/125 sek	339
iPhone 6 D3	D3	250	2,2	1/125 sek	330
iPhone XS D1	D1	250	1,8	1/125 sek	369
iPhone XS D2	D2	250	1,8	1/125 sek	353
iPhone XS D3	D3	250	1,8	1/125 sek	344

Tab. G.3: Scannereinstellungen

Aufnahmegerät	Datensatz	Scanner Einstellungen				Zusatz- beleuchtung
		Auflösung	Qualität	HDR	Anahl Scanpositionen	
FARO Focus <sup>S</sup> 350	D1	1/8 (12 mm @ 10 m)	4x	aus	2	aus
FARO Focus <sup>S</sup> 350	D2	1/8 (12 mm @ 10 m)	2x	aus	2	aus
FARO Focus <sup>S</sup> 350	D3	1/8 (12 mm @ 10 m)	4x	aus	2	an
FARO Focus <sup>S</sup> 350	D4	1/8 (12 mm @ 10 m)	2x	aus	2	an
		Maximale Reichweite:	Software	-	-	Bitz
FARO Freestyle	D1	3 m	Scene Capture 2020.1			an
FARO Freestyle	D2	3 m	Scene Capture 2020.1			an



Tab. G.4: Renderings der Laserscans und Photogrammetrieaufnahmen

Qualität							
	Rendering	Laserscan		Photogrammetrie	Photogrammetrie		
		Faro Focus S 350	Faro Freestyle		Nikon D810	iPhone XS	iPhone 6
	D1			D1			
	D2			D2			
	D3			D3			
	D4						

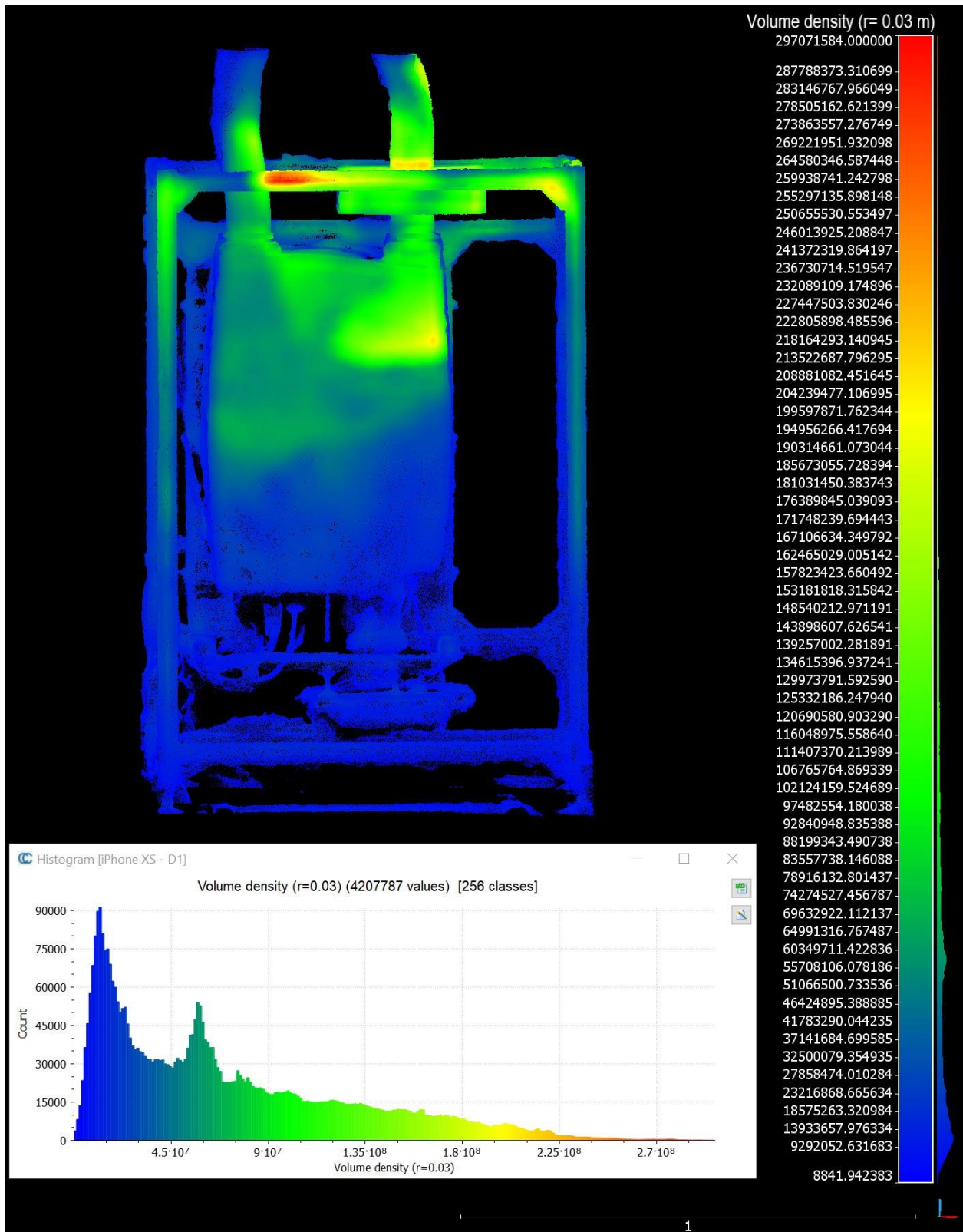


Abb. G.1: Punktwolkendichte des Datensatzes D1 des iPhone XS

In Abb. G.1 wird die Analyse Punktwolkendichte des Datensatzes D1 des iPhone XS dargestellt. Insgesamt beinhaltet der Datensatz 4.207.787 Punkte. Einen Verweis auf die Punktdichte der verschiedenen Bereiche zeigt die Skala (Abb. G.1, rechts) an. Rote Bereiche ( $\sim 2 \times 10^8$ ) weisen

eine sehr hohe Punktdichte auf, grüne Bereiche ( $\sim 1,35 \times 10^7$ ) eine mittlere Punktdichte und die am unteren Bereich gelegenen blauen Punkte weisen eine vergleichsweise niedrige Punktdichte ( $< 4 \times 10^7$ ) auf. Mithilfe der Software CloudCompare wird die Punktdichte angegeben, indem für jeden Punkt die Anzahl der Nachbarn  $N$  innerhalb einer Kugel mit einem Radius gezählt wird. Bei der vorliegenden Analyse wird die Punktdichte bzw. Volumendichte unter Berücksichtigung einer Kugel mit dem Radius 0,03 m angegeben. Der Datensatz D1 des iPhone XS besitzt eine Volumendichte, die zwischen 0 und ca.  $2 \times 10^8$  Punkten liegt. Die meisten Punkte liegen in dem Bereich von  $< 4 \times 10^7$  (Abb. G.1).

In Abb. G.2 wird die Analyse Punktwolkendichte des Datensatzes D1 des FARO Freestyle dargestellt. Insgesamt beinhaltet der Datensatz 748.648 Punkte. Einen Verweis auf die Punktdichte der verschiedenen Bereiche zeigt die Skala (Abb. G.2, rechts) an. Rote Bereiche ( $\sim 3,6 \times 10^7$ ) weisen eine sehr hohe Punktdichte auf, grüne Bereiche ( $\sim 1,8 \times 10^7$ ) eine mittlere Punktdichte und die am unteren Bereich gelegenen blauen Punkte weisen eine vergleichsweise niedrige Punktdichte ( $< 6 \times 10^6$ ) auf. Mithilfe der Software CloudCompare wird die Punktdichte angegeben, indem für jeden Punkt die Anzahl der Nachbarn  $N$  innerhalb einer Kugel mit einem Radius gezählt wird. Bei der vorliegenden Analyse wird die Punktdichte bzw. Volumendichte unter Berücksichtigung einer Kugel mit dem Radius 0,03 m angegeben. Der Datensatz D2 des FARO Freestyle besitzt eine Volumendichte, die zwischen 0 und ca.  $3,6 \times 10^7$  Punkten liegt. Die meisten Punkte liegen in dem Bereich von  $6 \times 10^6$  (Abb. G.2).

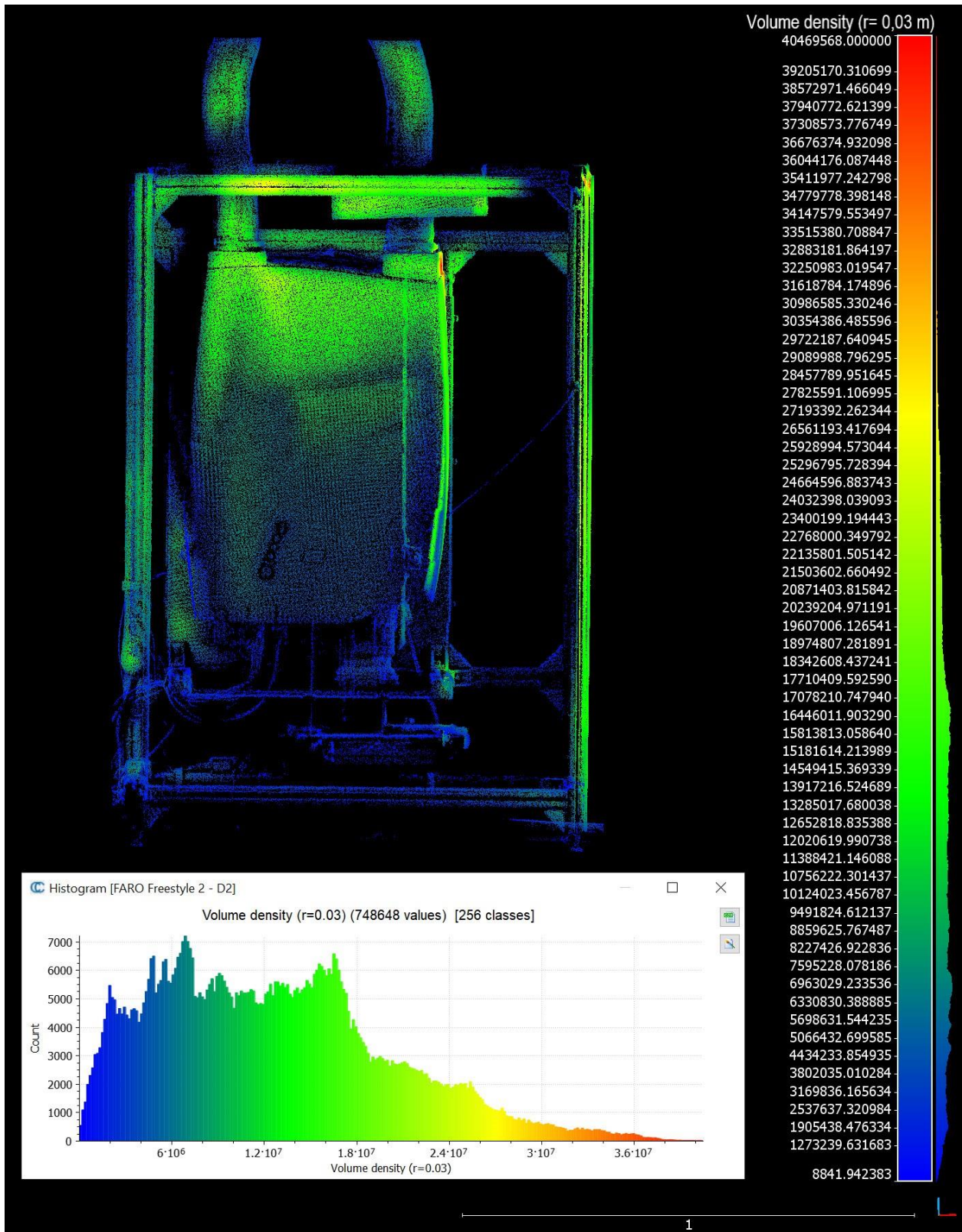


Abb. G.2: Punktwolkendichte des Datensatzes D2 des FARO Freestyle 2

Tab. G.5: Fragebogen zur Validierung des Aktualisierungsvorgehens via Photogrammetrie

# Validierung Aktualisierungsvorgehen via Photogrammetrie

TT.MM.JJJJ

Bewertung durch Fabrikplaner

**Frage 1:**

Wie bewerten Sie die Datenqualitätsdimensionen von digitalen Fabrikgebäudemodellen hinsichtlich ihrer Relevanz? Kreuzen Sie die zutreffende Antwort:

Datenqualitätsdimension	Sehr unrelevant	Unrelevant	Teilweise relevant	Relevant	Sehr Relevant
<b>Aktualität</b>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Fehlerhaftigkeit</b>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Vollständigkeit</b>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Genauigkeit</b>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Verfügbarkeit</b>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Frage 2:**

Werden bei Ihnen im Unternehmen bereits Aktualisierungen von digitalen Fabrikgebäudemodellen (Punktwolken und BIM-Modellen) durchgeführt?

**Ja**

**Nein**

Falls **Ja**, beschreiben Sie kurz das Vorgehen: Welche Art von Modell (Punktwolke oder BIM-Modell) wird aktualisiert und wie wird vorgegangen (z.B. Erneute Aufnahme durch Laserscan)?

Art des aktualisierten Modells	Beschreibung des Vorgehens

**Frage 3:**

Basierend auf dem vorgestellten Vorgehen zur Aktualisierung via Photogrammetrie und den unten aufgeführten Testergebnissen, wie bewerten Sie die Eignung des Vorgehens zur Aktualisierung von digitalen Fabrikgebäudemodellen?

**Testergebnisse:**

Tab. 1: Vergleich der Aufnahmezeit vor Ort													
Dauer	Aufnahme	Laserscan			Photogrammetrie			Nikon D810		iPhone XS		iPhone 6	
		FARO Focus <sup>®</sup> 350	FARO Freestyle 2										
		[hh:mm:ss]	[hh:mm:ss]				[hh:mm:ss]	[hh:mm:ss]	[hh:mm:ss]	[hh:mm:ss]	[hh:mm:ss]	[hh:mm:ss]	
D1		00:13:55			D1		00:08:30						
D2		00:10:26			D2		00:08:30						
D3		00:13:55			D3		00:08:30						
D4		00:10:26											
	D1		00:05:04		D1		00:08:30					00:08:30	
	D2		00:05:05		D2		00:08:30					00:08:30	
					D3		00:08:30					00:08:30	
					D1							00:08:30	
					D2							00:08:30	
					D3							00:08:30	

Tab. 5: Vergleich der Nachbearbeitungszeit													
Dauer	Nachbearbeitung	Laserscan			Photogrammetrie			Nikon D810		iPhone XS		iPhone 6	
		FARO Focus <sup>®</sup> 350	FARO Freestyle 2										
		[hh:mm:ss]	[hh:mm:ss]				[hh:mm:ss]	[hh:mm:ss]	[hh:mm:ss]	[hh:mm:ss]	[hh:mm:ss]	[hh:mm:ss]	
D1		00:02:36			D1		01:45:21						
D2		00:03:25			D2		02:12:01						
D3		00:03:02			D3		01:30:01						
D4		00:03:30											
	D1				D1		01:45:11						
	D2				D2		01:32:03						
					D3		01:05:33						
	D1		00:02:16		D1							00:36:03	
	D2		00:02:17		D2							00:37:11	
					D3							00:28:25	
					D1							00:36:03	
					D2							00:37:11	
					D3							00:28:25	

Tab. 3: Vergleich der Gerätekosten													
Kosten	Gerätekosten	Laserscan			Photogrammetrie			Nikon D810		iPhone XS		iPhone 6	
		FARO Focus <sup>®</sup> 350	FARO Freestyle 2										
		[€]	[€]				[€]	[€]	[€]	[€]	[€]	[€]	
		ca. 56.000 €					ca. 1.227 €						
			ca. 17.500 €							ca. 559 €			
												ca. 199 €	

Tab. 4: Vergleich der entstehenden Datenmenge													
Datenmenge	Dateigröße	Laserscan			Photogrammetrie			Nikon D810		iPhone XS		iPhone 6	
		FARO Focus <sup>®</sup> 350	FARO Freestyle 2										
		[MB]	[MB]				[MB]	[MB]	[MB]	[MB]	[MB]	[MB]	
D1		302 MB			D1		736 MB						
D2		294 MB			D2		744 MB						
D3		309 MB			D3		726 MB						
D4		295 MB											
	D1				D1							246 MB	
	D2				D2							239 MB	
					D3							255 MB	
	D1		37 MB		D1							216 MB	
	D2		47 MB		D2							230 MB	
					D3							204 MB	
					D1							216 MB	
					D2							230 MB	
					D3							204 MB	

Vorgeschlagenes Verfahren	Sehr ungeeignet	Ungeeignet	Teilweise geeignet	Geeignet	Sehr geeignet
<b>Aktualisierung von digitalen Fabrikgebäudemodellen via Photogrammetrie</b>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Tab. G.6: Fragebogen zur Validierung des Aktualisierungsvorgehens via Photogrammetrie – Fachexperten

# Validierung Aktualisierungsvorgehen via Photogrammetrie

15.03.2022

Bewertung durch Fabrikplaner

**Frage 1:**

Wie bewerten Sie die Datenqualitätsdimensionen von digitalen Fabrikgebäudemodellen hinsichtlich ihrer Relevanz? Kreuzen Sie die zutreffende Antwort:

Datenqualitätsdimension	Sehr unrelevant	Unrelevant	Teilweise relevant	Relevant	Sehr Relevant
<b>Aktualität</b>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<b>Fehlerhaftigkeit</b>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<b>Vollständigkeit</b>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<b>Genauigkeit</b>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<b>Verfügbarkeit</b>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

**Frage 2:**

Werden bei Ihnen im Unternehmen bereits Aktualisierungen von digitalen Fabrikgebäudemodellen (Punktwolken und BIM-Modellen) durchgeführt?

- Ja**
- Nein**

**Falls Ja:**

Beschreiben Sie kurz das Vorgehen

Art des aktualisierten Modells	Beschreibung des Vorgehens
Neu- und Umbau-Planung eines Produktionsbereiches. Center, Linie, Zelle	3D Laserscan mit dem BLK 360 von Leica. Digitale Nachbearbeitung der Punktwolken. Punktwolke als Modellierungsgrundlage für die Neu- und Umbauplanung in den verschiedenen CAD-Systemen. Vergleich des As-Built Standes mit den vorhandenen Planungsunterlagen → Punktwolke und BIM Modell 3D Modellierung in CAD mit (zugeschnittener Punktwolke) als Referenz. Projektüberprüfung und Clash Detection. Visualisierung in den Projektgesprächen.

**Frage 3:**

Basierend auf dem vorgestellten Vorgehen zur Aktualisierung via Photogrammetrie und den unten aufgeführten Testergebnissen, wie bewerten Sie die Eignung des Vorgehens zur Aktualisierung von digitalen Fabrikgebäudemodellen?

**Testergebnisse:**

**Tab. 1: Vergleich der Aufnahmezeit vor Ort**

Dauer	Laserscan			Photogrammetrie		
	FARO Focus <sup>®</sup> 350	FARO Freestyle 2		Nikon D810	iPhone XS	iPhone 6
D1	00:13:55			00:08:30		
D2	00:10:26			00:08:30		
D3	00:13:55			00:08:30		
D4	00:10:26					
D1		00:05:04		D1		00:08:30
D2		00:05:05		D2		00:08:30
				D3		00:08:30
				D1		00:08:30
				D2		00:08:30
				D3		00:08:30

**Tab. 5: Vergleich der Nachbearbeitungszeit**

Dauer	Laserscan			Photogrammetrie		
	FARO Focus <sup>®</sup> 350	FARO Freestyle 2		Nikon D810	iPhone XS	iPhone 6
D1	00:02:36			D1		01:45:21
D2	00:03:25			D2		02:12:01
D3	00:03:02			D3		01:30:01
D4	00:03:30					
D1		00:02:16		D1		01:45:11
D2		00:02:17		D2		01:32:03
				D3		01:05:33
				D1		00:36:03
				D2		00:37:11
				D3		00:28:25

**Tab. 3: Vergleich der Gerätekosten**

Kosten	Laserscan			Photogrammetrie		
	FARO Focus <sup>®</sup> 350	FARO Freestyle 2		Nikon D810	iPhone XS	iPhone 6
	ca. 56.000 €			ca. 1.227 €		
		ca. 17.500 €			ca. 559 €	
						ca. 199 €

**Tab. 4: Vergleich der entstehenden Datenmenge**

Datenmenge	Laserscan			Photogrammetrie		
	FARO Focus <sup>®</sup> 350	FARO Freestyle 2		Nikon D810	iPhone XS	iPhone 6
D1	302 MB			D1	736 MB	
D2	294 MB			D2	744 MB	
D3	309 MB			D3	726 MB	
D4	295 MB					
D1		37 MB		D1		246 MB
D2		47 MB		D2		239 MB
				D3		255 MB
				D1		216 MB
				D2		230 MB
				D3		204 MB

Vorgeschlagenes Verfahren	Sehr ungeeignet	Ungeeignet	Teilweise geeignet	Geeignet	Sehr geeignet
Aktualisierung von digitalen Fabrikgebäudemodellen via Photogrammetrie	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Digital Factory Expert - Industrial Engineering

email: [redacted]  
 mobile: [redacted]  
 website: [redacted]



## Anhang H Validierung – Methode 2: Change Impact Analyse

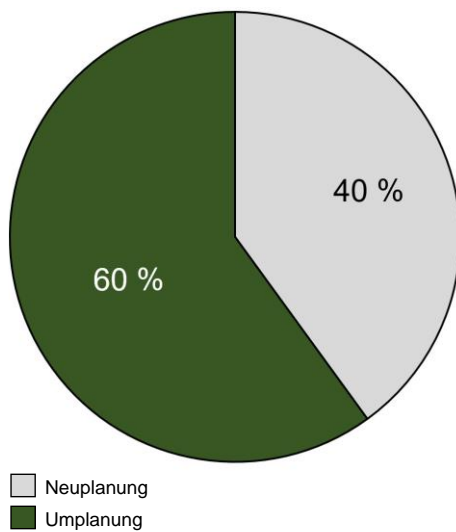


Abb. H.1: Häufigkeitsverteilung der Grundplanungsfälle laut Interviewteilnehmern (Befragung von 5 Fabrikplanern)

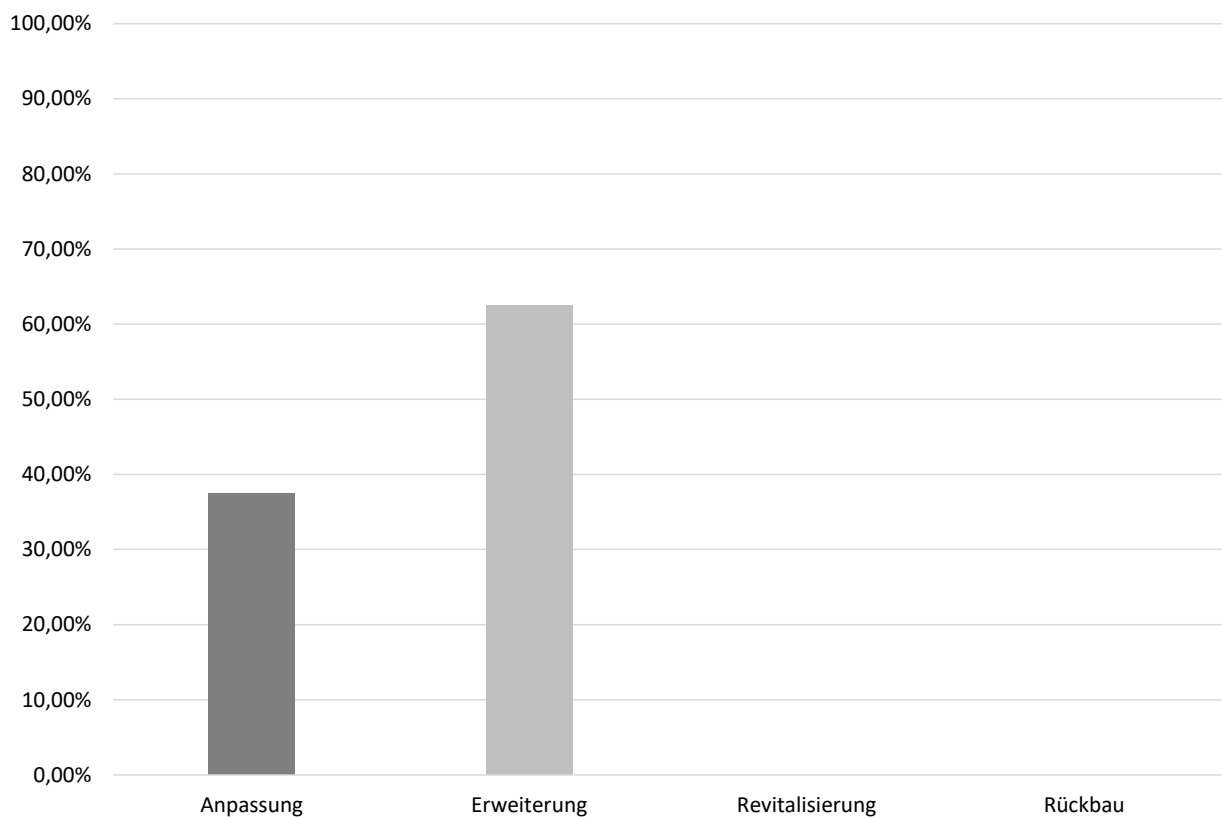


Abb. H.2: Häufigkeitsverteilung der Umplanung untergeordneter Planungsfälle laut Interviewteilnehmern (Befragung von 5 Fabrikplanern)

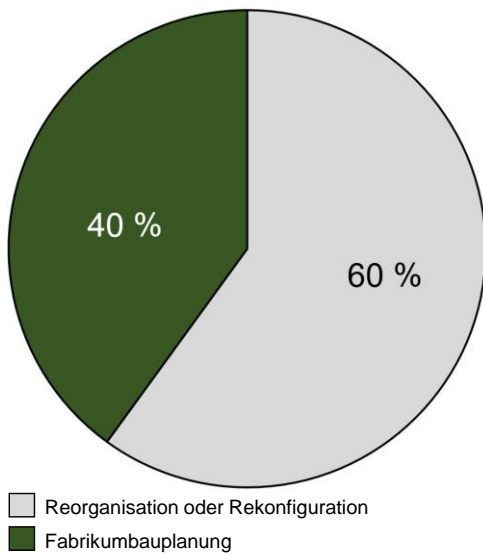


Abb. H.3: Häufigkeitsverteilung von Reorganisationen bzw. Rekonfigurationen und Fabrikumbauplanungen laut Interviewteilnehmern (Befragung von 5 Fabrikplanern)

Tab. H.1: Tatsächliche Auswirkungen auf die Fabrikobjekte – Fallstudie 1

Fabrikobjekte / Gewerke	Fabrikobjekt / Gewerk betroffen?	
	Ja	Nein
Produktionstechnologie	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Produktionsmittel	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Aufbauorganisation	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Produktionskonzept	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Fabrikstruktur	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Logistikkonzept	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Arbeitsorganisation	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Qualitätssicherungskonzept	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Lagermittel	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Transportmittel	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sonstige Mittel	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Informationstechnik	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Produkt	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Arbeitsplatzgestaltung	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Layout	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Technische Anlagen - Zentralen	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Technische Anlagen – Verteilung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Bauform	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Innenausbau	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Grundstück	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Generalbebauung	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Außenanlagen	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Tragwerk	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Hülle	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>



Fabrikobjekte der Produktion



Fabrikobjekte des Industriebaus

Tab. H.2: Von der Change Impact Analyse identifizierte Auswirkungen auf die Fabrikobjekte – Fallstudie 1

Fabrikobjekte / Gewerke	Fabrikobjekt / Gewerk betroffen?	
	Ja	Nein
Produktionstechnologie	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Produktionsmittel	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Aufbauorganisation	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Produktionskonzept	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Fabrikstruktur	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Logistikkonzept	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Arbeitsorganisation	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Qualitätssicherungskonzept	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Lagermittel	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Transportmittel	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Sonstige Mittel	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Informationstechnik	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Produkt	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Arbeitsplatzgestaltung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Layout	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Technische Anlagen - Zentralen	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Technische Anlagen – Verteilung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Bauform	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Innenausbau	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Grundstück	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Generalbebauung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Außenanlagen	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Tragwerk	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Hülle	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>



Fabrikobjekte der Produktion



Fabrikobjekte des Industriebaus

Tab. H.3: Vergleich der tatsächlichen und identifizierten Auswirkungen auf die Fabrikobjekte – Fallstudie 1

Fabrikobjekte / Gewerke	Fabrikobjekt / Gewerk betroffen?	
	Ja	Nein
Produktionstechnologie	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Produktionsmittel	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Aufbauorganisation	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Produktionskonzept	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Fabrikstruktur	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Logistikkonzept	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Arbeitsorganisation	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Qualitätssicherungskonzept	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Lagermittel	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Transportmittel	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Sonstige Mittel	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Informationstechnik	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Produkt	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Arbeitsplatzgestaltung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Layout	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Technische Anlagen - Zentralen	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Technische Anlagen – Verteilung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Bauform	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Innenausbau	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Grundstück	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Generalbebauung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Außenanlagen	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Tragwerk	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Hülle	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>



korrekte Abschätzung



fehlerhafte Abschätzung

Tab. H.4: Tatsächliche Auswirkungen auf die Fabrikobjekte – Fallstudie 2

Fabrikobjekte / Gewerke	Fabrikobjekt / Gewerk betroffen?	
	Ja	Nein
Produktionstechnologie	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Produktionsmittel	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Aufbauorganisation	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Produktionskonzept	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Fabrikstruktur	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Logistikkonzept	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Arbeitsorganisation	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Qualitätssicherungskonzept	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Lagermittel	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Transportmittel	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sonstige Mittel	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Informationstechnik	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Produkt	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Arbeitsplatzgestaltung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Layout	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Technische Anlagen - Zentralen	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Technische Anlagen – Verteilung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Bauform	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Innenausbau	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Grundstück	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Generalbebauung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Außenanlagen	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Tragwerk	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Hülle	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>



Fabrikobjekte der Produktion



Fabrikobjekte des Industriebaus

Tab. H.5: Von der Change Impact Analyse identifizierte Auswirkungen auf die Fabrikobjekte – Fallstudie 2

Fabrikobjekte / Gewerke	Fabrikobjekt / Gewerk betroffen?	
	Ja	Nein
Produktionstechnologie	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Produktionsmittel	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Aufbauorganisation	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Produktionskonzept	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Fabrikstruktur	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Logistikkonzept	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Arbeitsorganisation	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Qualitätssicherungskonzept	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Lagermittel	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Transportmittel	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Sonstige Mittel	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Informationstechnik	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Produkt	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Arbeitsplatzgestaltung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Layout	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Technische Anlagen - Zentralen	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Technische Anlagen – Verteilung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Bauform	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Innenausbau	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Grundstück	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Generalbebauung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Außenanlagen	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Tragwerk	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Hülle	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>



Fabrikobjekte der Produktion



Fabrikobjekte des Industriebaus

Tab. H.6: Vergleich der tatsächlichen und identifizierten Auswirkungen auf die Fabrikobjekte – Fallstudie 2

Fabrikobjekte / Gewerke	Fabrikobjekt / Gewerk betroffen?	
	Ja	Nein
Produktionstechnologie	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Produktionsmittel	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Aufbauorganisation	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Produktionskonzept	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Fabrikstruktur	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Logistikkonzept	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Arbeitsorganisation	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Qualitätssicherungskonzept	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Lagermittel	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Transportmittel	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Sonstige Mittel	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Informationstechnik	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Produkt	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Arbeitsplatzgestaltung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Layout	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Technische Anlagen - Zentralen	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Technische Anlagen – Verteilung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Bauform	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Innenausbau	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Grundstück	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Generalbebauung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Außenanlagen	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Tragwerk	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Hülle	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>



korrekte Abschätzung



fehlerhafte Abschätzung



Tab. H.7: Tatsächliche Auswirkungen auf die Fabrikobjekte – Fallstudie 3

Fabrikobjekte / Gewerke	Fabrikobjekt / Gewerk betroffen?	
	Ja	Nein
Produktionstechnologie	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Produktionsmittel	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Aufbauorganisation	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Produktionskonzept	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Fabrikstruktur	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Logistikkonzept	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Arbeitsorganisation	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Qualitätssicherungskonzept	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Lagermittel	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Transportmittel	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sonstige Mittel	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Informationstechnik	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Produkt	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Arbeitsplatzgestaltung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Layout	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Technische Anlagen - Zentralen	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Technische Anlagen – Verteilung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Bauform	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Innenausbau	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Grundstück	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Generalbebauung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Außenanlagen	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Tragwerk	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Hülle	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>



Fabrikobjekte der Produktion



Fabrikobjekte des Industriebaus

Tab. H.8: Von der Change Impact Analyse identifizierte Auswirkungen auf die Fabrikobjekte – Fallstudie 3

Fabrikobjekte / Gewerke	Fabrikobjekt / Gewerk betroffen?	
	Ja	Nein
Produktionstechnologie	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Produktionsmittel	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Aufbauorganisation	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Produktionskonzept	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Fabrikstruktur	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Logistikkonzept	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Arbeitsorganisation	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Qualitätssicherungskonzept	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Lagermittel	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Transportmittel	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sonstige Mittel	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Informationstechnik	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Produkt	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Arbeitsplatzgestaltung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Layout	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Technische Anlagen - Zentralen	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Technische Anlagen – Verteilung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Bauform	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Innenausbau	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Grundstück	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Generalbebauung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Außenanlagen	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Tragwerk	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Hülle	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>



Fabrikobjekte der Produktion



Fabrikobjekte des Industriebaus

Tab. H.9: Vergleich der tatsächlichen und identifizierten Auswirkungen auf die Fabrikobjekte – Fallstudie 3

Fabrikobjekte / Gewerke	Fabrikobjekt / Gewerk betroffen?	
	Ja	Nein
Produktionstechnologie	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Produktionsmittel	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Aufbauorganisation	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Produktionskonzept	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Fabrikstruktur	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Logistikkonzept	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Arbeitsorganisation	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Qualitätssicherungskonzept	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Lagermittel	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Transportmittel	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sonstige Mittel	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Informationstechnik	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Produkt	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Arbeitsplatzgestaltung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Layout	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Technische Anlagen - Zentralen	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Technische Anlagen – Verteilung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Bauform	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Innenausbau	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Grundstück	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Generalbebauung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Außenanlagen	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Tragwerk	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Hülle	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>



korrekte Abschätzung



fehlerhafte Abschätzung

Tab. H.10: Tatsächliche Auswirkungen auf die Fabrikobjekte – Fallstudie 4

Fabrikobjekte / Gewerke	Fabrikobjekt / Gewerk betroffen?	
	Ja	Nein
Produktionstechnologie	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Produktionsmittel	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Aufbauorganisation	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Produktionskonzept	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Fabrikstruktur	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Logistikkonzept	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Arbeitsorganisation	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Qualitätssicherungskonzept	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Lagermittel	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Transportmittel	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Sonstige Mittel	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Informationstechnik	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Produkt	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Arbeitsplatzgestaltung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Layout	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Technische Anlagen - Zentralen	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Technische Anlagen – Verteilung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Bauform	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Innenausbau	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Grundstück	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Generalbebauung	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Außenanlagen	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Tragwerk	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Hülle	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>



Fabrikobjekte der Produktion



Fabrikobjekte des Industriebaus

Tab. H.11: Von der Change Impact Analyse identifizierte Auswirkungen auf die Fabrikobjekte – Fallstudie 4

Fabrikobjekte / Gewerke	Fabrikobjekt / Gewerk betroffen?	
	Ja	Nein
Produktionstechnologie	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Produktionsmittel	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Aufbauorganisation	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Produktionskonzept	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Fabrikstruktur	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Logistikkonzept	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Arbeitsorganisation	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Qualitätssicherungskonzept	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Lagermittel	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Transportmittel	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sonstige Mittel	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Informationstechnik	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Produkt	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Arbeitsplatzgestaltung	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Layout	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Technische Anlagen - Zentralen	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Technische Anlagen – Verteilung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Bauform	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Innenausbau	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Grundstück	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Generalbebauung	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Außenanlagen	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Tragwerk	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Hülle	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>



Fabrikobjekte der Produktion



Fabrikobjekte des Industriebaus

Tab. H.12: Vergleich der tatsächlichen und identifizierten Auswirkungen auf die Fabrikobjekte – Fallstudie 4

Fabrikobjekte / Gewerke	Fabrikobjekt / Gewerk betroffen?	
	Ja	Nein
Produktionstechnologie	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Produktionsmittel	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Aufbauorganisation	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Produktionskonzept	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Fabrikstruktur	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Logistikkonzept	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Arbeitsorganisation	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Qualitätssicherungskonzept	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Lagermittel	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Transportmittel	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sonstige Mittel	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Informationstechnik	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Produkt	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Arbeitsplatzgestaltung	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Layout	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Technische Anlagen - Zentralen	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Technische Anlagen – Verteilung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Bauform	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Innenausbau	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Grundstück	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Generalbebauung	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Außenanlagen	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Tragwerk	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Hülle	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

korrekte Abschätzung     fehlerhafte Abschätzung

Tab. I.1: Informationsanforderungsliste Umbaubeteiligte (Theoretisches Fallbeispiel)

Anforderungsliste										
KG	BIM-Objekt			Zugehörige Informationen (zum BIM-Objekt)	Dringlichkeit	Informationsanforderer	Austauschformat		Zeitpunkt des Datenaustauschs	
	Modell-Element	Stockwerk	Raum/ Stützenraster				Standort/ Koordinaten	Daten-Format		Anwendung und Version
300	Bauwerk- Baukonstruktionen									
	Gründung, Unterbau									
	Flachgründungen und Bodenplatten	EG			Tragfähigkeit, Betonfestigkeitsklasse, Bauteildicke	notwendig	Tragwerksplaner B	.ivt	Autodesk Revit 2021	01.07.2020
	Außenwände / Vertikale Baukonstruktionen, außen	EG			Geometrie, Abmessungen, Bewehrungsgrad	notwendig	Tragwerksplaner B	.ivt	Autodesk Revit 2021	01.07.2020
	Tragende Außenwände	EG			Geometrie, Lage	notwendig	Logistikplaner	.e57	CloudCompare	01.07.2020
	Außenwandöffnungen	EG								
	Innenwände / Vertikale Baukonstruktionen, innen	EG			Bewehrungsgrad	notwendig	Tragwerksplaner B	.ivt	Autodesk Revit 2021	01.07.2020
	Tragende Innenwände	EG			Geometrie, Lage	notwendig	Tragwerksplaner B	.ivt	Autodesk Revit 2021	01.07.2020
	Nichttragende Innenwände	EG			Bewehrungsgrad	notwendig	Tragwerksplaner B	.ivt	Autodesk Revit 2021	01.07.2020
	Innenstützen	EG			Geometrie, Lage	notwendig	Produktionsplaner	.e57	CloudCompare	01.07.2020
	Innenstützen	EG								
	Wärmeversorgungsanlagen				Leistung	notwendig	Automationsplaner B	.ivt	Autodesk Revit 2021	01.07.2020
	Wärmeerzeugungsanlagen	EG								
	Raumlufttechnische Anlagen									
	Lüftungsanlagen	EG			Max. Luftdurchsatz, Externe Pressung, Max. elektr. Leistungsaufnahme, Max. Stromaufnahme, Schalldruckpegel in 10m	notwendig	Automationsplaner B	.ivt	Autodesk Revit 2021	01.07.2020
	Klimaanlagen	EG			Max. Luftdurchsatz, Externe Pressung	notwendig	Automationsplaner B	.ivt	Autodesk Revit 2021	01.07.2020
	Elektrische Anlagen									
	Niederspannungsschaltanlagen	EG			Bemessungsbetriebsspannung max.	notwendig	Automationsplaner B	.ivt	Autodesk Revit 2021	01.07.2020
	Kommunikations-, sicherheits- und informationstechnische Anlagen									
	Datenübertragungsnetze	EG			Aschlüsse	notwendig	Produktionsplaner B	.ivt	Autodesk Revit 2021	01.07.2020
	Datenübertragungsnetze	EG			Aschlüsse	notwendig	Automationsplaner B	.ivt	Autodesk Revit 2021	01.07.2020
	Nutzungsspezifische und verfahrenstechnische Anlagen									
	Prozesswärme-, kälte- und -luftanlagen	EG			Max. Luftdurchsatz, Externe Pressung, Max. elektr. Leistungsaufnahme, Max. Stromaufnahme, Schalldruckpegel in 10m	notwendig	Automationsplaner B	.ivt	Autodesk Revit 2021	01.07.2020
	Gebäude- und Anlagenautomation									
	Automationseinrichtungen	EG			Geometrie, Lage, Abmessungen, Ausgänge	notwendig	Produktionsplaner B	.ivt	Autodesk Revit 2021	01.07.2020
	Automationseinrichtungen	EG			Versorgungsspannung, Abmessungen, Ausgänge	notwendig	Automationsplaner B	.ivt	Autodesk Revit 2021	01.07.2020
	Schaltstränge	EG			Abmessungen	notwendig	Automationsplaner B	.ivt	Autodesk Revit 2021	01.07.2020
	Kabel, Leitungen und Verlegesysteme	EG			Aschlüsse, Steckverbinder, Pohlzahl, Pin-Belegung, Bemessungsspannung	notwendig	Automationsplaner B	.ivt	Autodesk Revit 2021	01.07.2020
	Datenübertragungsnetze	EG			Übertragungsleistung, Max. Betriebstemperatur	notwendig	Automationsplaner B	.ivt	Autodesk Revit 2021	01.07.2020
	Kostengruppe									

KG:

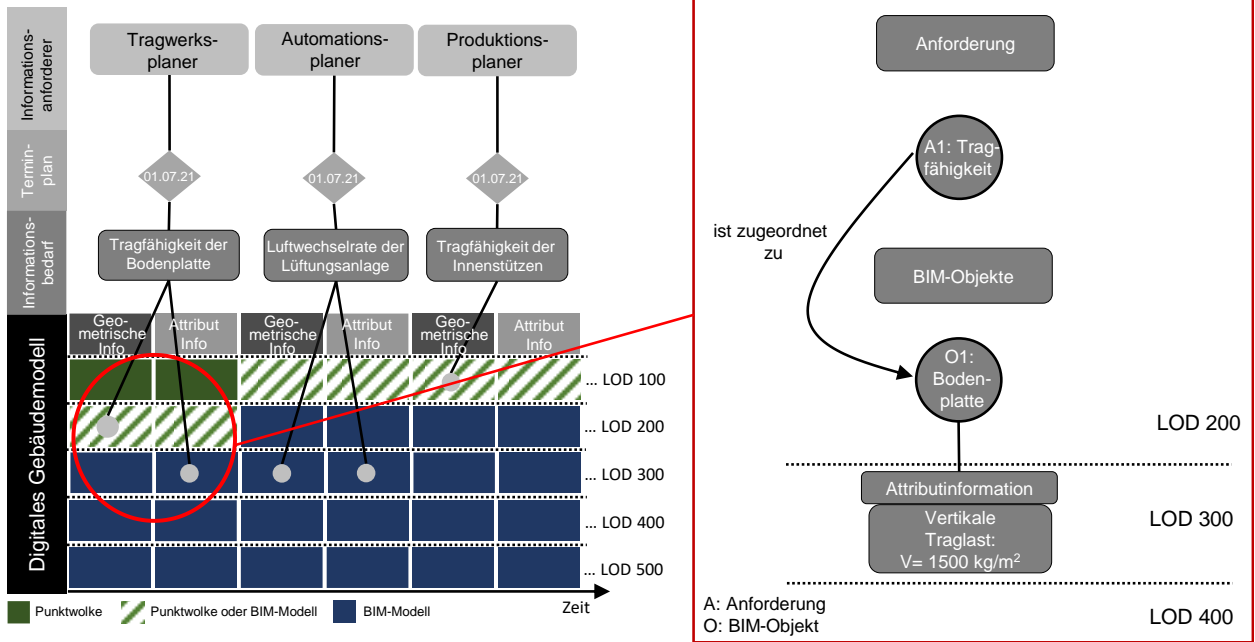


Abb. I.1: Zuordnung der Informationsanforderung Tragfähigkeit zum BIM-Objekt Bodenplatte



Tab. J.1: Dimensionen der Wiedergabetreue AR basierter Softwarewerkzeuge angelehnt an [Reinemann et al. 2019, S. 41]

<i>Wiedergabedimensionen</i>		<i>Beschreibung</i>	
Erscheinung (visuell)	Größe	Proportionen	Größenverhältnis der Bereiche des Fabrikgebäudes untereinander
		Räumliche Dimensionen	Größenverhältnis der Aufbauten im Produktionsbereich zum Fabrikgebäude
	Lage	Räumliche Orientierung	Rotatorische Lage der Aufbauten im Produktionsbereich zum Fabrikgebäude
		Räumliche Positionierung	Translatorische Lage der Aufbauten im Produktionsbereich zum Fabrikgebäude
	Farbe	Farbwirkung	Farben und Texturen von Oberflächen von Aufbauten und des Fabrikgebäudes
		Lichtwirkung	Licht, Schatten, Reflexionen in Wechselwirkung mit Aufbauten und Fabrikgebäude
	Form und Struktur	Form	Außenkontur der Aufbauten im Produktionsbereich und des Fabrikgebäudes
		Konstruktions-tiefe	Visuelle Differenzierung der Teilsysteme der Aufbauten im Produktionsbereich und des Fabrikgebäudes
		Wirk-beziehungen	Visuelle Kopplung und Wechselwirkungen zwischen Teilsystemen des Produktionsbereichs und des Fabrikgebäudes
Funktionalität	Funktionsumfang	Anzahl durchführbarer Operationen (z.B. Ein- und Ausblenden etc.)	
	Funktions-tiefe	Ausprägung der durchführbaren Operationen	
Interaktivität	Eingabe-verhalten	Anzahl möglicher Aktionen zur Interaktion mit dem Fabrikgebäude (z.B. Dropdown-Menü)	
	Ausgabe-verhalten	Anzahl möglicher Reaktionen aus der Interaktion mit dem Fabrikgebäude (z.B. Darstellung von Metainformationen)	

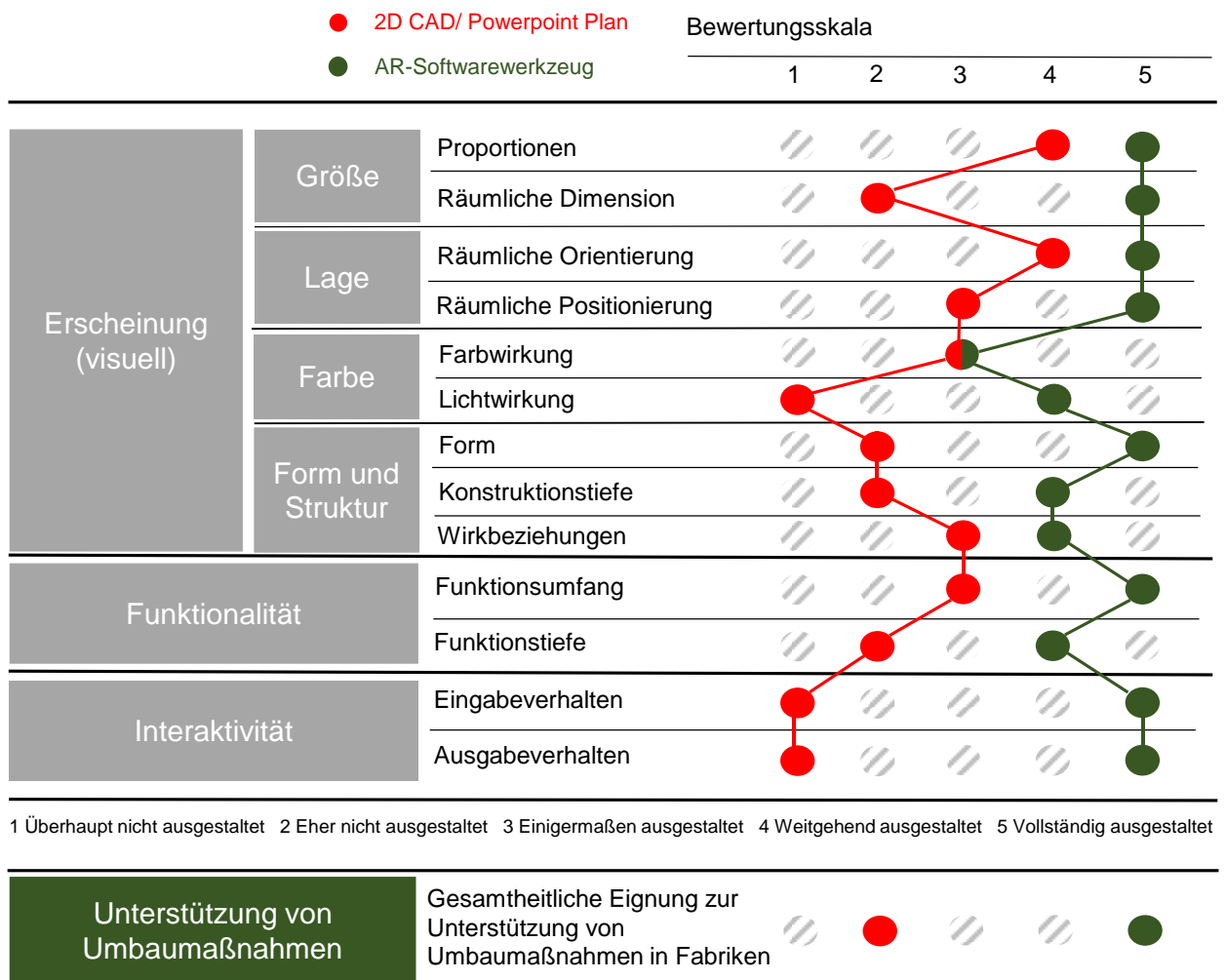


Abb. J.1: Bewertung der verglichenen Planungslösungen durch Planungsteammitglied 1

			Bewertungsskala				
			1	2	3	4	5
Erscheinung (visuell)	Größe	Proportionen	/	/	●	●	/
		Räumliche Dimension	●	/	/	●	/
	Lage	Räumliche Orientierung	/	●	●	/	/
		Räumliche Positionierung	/	/	●	●	/
	Farbe	Farbwirkung	/	●	/	●	/
		Lichtwirkung	●	/	●	/	/
	Form und Struktur	Form	/	●	/	●	/
		Konstruktionstiefe	/	●	/	●	/
		Wirkbeziehungen	●	/	/	●	/
	Funktionalität	Funktionsumfang	/	●	/	●	/
Funktionstiefe		●	/	●	/	/	
Interaktivität	Eingabeverhalten	●	/	●	/	/	
	Ausgabeverhalten	●	/	/	●	/	
Unterstützung von Umbaumaßnahmen		Gesamtheitliche Eignung zur Unterstützung von Umbaumaßnahmen in Fabriken	/	/	●	●	/

1 Überhaupt nicht ausgestaltet 2 Eher nicht ausgestaltet 3 Einigermaßen ausgestaltet 4 Weitgehend ausgestaltet 5 Vollständig ausgestaltet

Abb. J.2: Bewertung der verglichenen Planungslösungen durch Planungsteammitglied 2



Im turbulenten Unternehmensumfeld ist die reaktive Anpassungsfähigkeit von Fabriken auf Grundlage von digitalen Modellen zu einem entscheidenden Wettbewerbsfaktor geworden. In Anbetracht der Bedeutung des Gebäudes in der Fabrikplanung werden digitale Gebäudemodelle bisher nicht konsequent eingesetzt.

In der vorliegenden Arbeit wurde deshalb eine Methodik zur Unterstützung der Fabrikumbauplanung unter Verwendung eines aktuellen digitalen Fabrikgebäudemodells entwickelt. Die Prozesse, die der Aktualisierung des digitalen Fabrikgebäudemodells in der Phase der Informationsbeschaffung nachgelagert stattfinden und Teil des Prozesses der Fabrikumbauplanung sind, werden ebenfalls adressiert. Dazu gehört, die Auswirkungen von Anpassungen auf das Fabrikgebäude zu identifizieren, Informationsanforderungen der beteiligten Planungsdisziplinen an das Fabrikgebäudemodell zu erheben sowie Informationen zur Entscheidungsunterstützung bereitzustellen. Die Anwendung der Methodik unterstützt somit den Prozess der Fabrikumbauplanung und führt zur Reduktion der Reaktionszeit, indem notwendige Umbauplanungsmaßnahmen direkt mit Bezug auf aktuelle digitale Fabrikgebäudemodelle beginnen können.