

# Digitale Assistenzsysteme für kollaboratives Arbeiten in der Unikatproduktion

Vom Promotionsausschuss der  
Technischen Universität Hamburg

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von  
Jan Robert Rost

aus  
Kiel

2023

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Hermann Lödding  
Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Norbert Gronau

Tag der mündlichen Prüfung: 16. Dezember 2022



## Wissen schafft Innovation

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. habil. Hermann Lödding  
Prof. Dr.-Ing. Jan Hendrik Dege  
Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Hintze  
Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Christian Nedeß

Anschrift:

Technische Universität Hamburg  
Institut für Produktionsmanagement und -technik  
Denickestraße 17  
21073 Hamburg

Band 49:

Jan Robert Rost

Digitale Assistenzsysteme für kollaboratives Arbeiten in der Unikatproduktion

1. Auflage

Hamburg 2023

ISSN 1613-8244

DOI: <https://doi.org/10.15480/882.4912>

Copyright Jan Robert Rost 2023

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionsmanagement und -technik der Technischen Universität Hamburg.

Mein Dank gilt dem Leiter des Instituts und Erstgutachter meiner Arbeit Herrn Professor Hermann Lödding. Ich bedanke mich für die Betreuung meiner Arbeit und die wertvollen Anregungen, Kommentare und Diskussionen. Herrn Professor Norbert Gronau danke ich für das Interesse an meiner Arbeit und die Erstellung des Zweitgutachtens. Herrn Professor Thorsten Schüppstuhl danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Bei meinen ehemaligen Kollegen möchte ich mich für die großartige Zeit am Institut bedanken. Die gemeinsamen Reisen, die Freizeitaktivitäten, die Abende und Feierlichkeiten machen die vergangenen Jahre für mich unvergesslich. Ein besonderer Dank gilt meinen ehemaligen Bürokollegen und Wegbegleitern Nikolaj Meluzov und Niklas Jahn. Nikolaj hat mir in meinen Forschungsaktivitäten sowie im Privaten mit Rat und Tat zur Seite gestanden, mir im Projektgeschehen die nötigen Freiräume ermöglicht und mich in anspruchsvollen Lebenssituationen unterstützt. Insbesondere hat Nikolaj zu einer Ergebnis- und auch Ereignisreichen Analyse beigetragen. Niklas hat mich bei allen technischen Belangen zu jeder Tages- und Nachtzeit unterstützt und so insbesondere die Evaluation meiner Arbeit ermöglicht. Ich danke Euch beiden für die tolle Zeit und die innige Freundschaft und freue mich auf die gemeinsame Zukunft! Weiterhin danke ich Dr. Axel Friedewald dafür, dass er mir das notwendige Handwerkszeug, die Herangehens- und Arbeitsweisen und die Methoden und Ansätze beigebracht und darüber hinaus für ein wunderbares Arbeitsklima am Institut gesorgt hat. Insbesondere möchte ich mich bei Dir für den Rückhalt und das Vertrauen in allen, aber insbesondere den herausfordernden Phasen im Leben bedanken!

Aus dem Kreis der Studierenden gilt mein besonderer Dank Silvana Schmiel und Sven Ditzel. Beide haben durch ihre fachliche Expertise, durch ihre Bachelor-, Projekt- und Masterarbeiten und allgemein durch ihren Frohsinn und ihre positive Art meine Arbeit bereichert.

Mein persönlicher Dank gilt meiner Familie, die mich immer darin bestärkt hat, meine persönlichen Ziele und Wünsche im Leben zu verfolgen. Ich danke meinem Vater Jürgen dafür, mir den Weg und die Faszination für die Wissenschaft vorgelebt zu haben und meiner Mutter Elisabeth sowie meiner Schwester Lisa für das Vertrauen, den Rückhalt und die Unterstützung während der Schul-, Studien- und Promotionszeit. Meiner Schwiegermutter Susann danke ich für die vielen Spontaneinsätze zur Unterstützung bei der Kinderbetreuung. Mein größter Dank gilt meiner Ehefrau Mareile für die Unterstützung in sämtlichen Lebenslagen und die Bekräftigungen während der Promotionszeit. Ganz besonders möchte ich Dir jedoch dafür danken, dass Du unseren wundervollen Kindern eine so großartige Mutter bist und widme diese Arbeit Dir, Jasper und Lennard.

Hamburg im Januar 2023

Robert Rost



<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Zielsetzung	1
1.2	Vorgehen und Aufbau der Arbeit	2
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1	Unikatproduktion	5
2.1.1	Zielgrößen	5
2.1.2	Merkmale	7
2.1.3	Strategien zur Verbesserung der Zielgrößen	11
2.2	Prozessstörungen	14
2.2.1	Störungsarten und -ursachen	14
2.2.2	Störungswirkung	15
2.2.3	Störungsmanagement	17
2.3	Kollaboratives Arbeiten	19
2.3.1	Akteure	19
2.3.2	Begriffseinordnung: Kollaboration	20
2.3.3	Begriffseinordnung: Information	21
2.3.4	Effiziente Kommunikation	22
2.3.5	Anforderungen effizienter Kommunikation	24
2.4	Digitale Assistenzsysteme	25
2.4.1	Werker-Assistenzsysteme	26
2.4.2	Digitale Kollaborationswerkzeuge	28
<b>3</b>	<b>Problemstellung und Lösungsweg</b>	<b>30</b>
3.1	Problemstellung	30
3.2	Einsatzszenarien und bestehende Lösungsansätze	31
3.3	Herausforderungen	33
3.4	Lösungsweg zur Bestimmung der wesentlichen Handlungsfelder	35
<b>4</b>	<b>Kollaborative Arbeitsprozesse in der Unikatproduktion</b>	<b>36</b>
4.1	Grundlegender Arbeitsprozess	36
4.1.1	Allgemeiner Ausrüstungsprozess	37
4.1.2	Akteure im Produktionsprozess	38
4.1.3	Dilemma verteilter Informationen	39
4.1.4	Kollaboration im allgemeinen Ausrüstungsprozess	41
4.2	Störungen im Prozessablauf	42
4.2.1	Störungswirkung in abhängigen Arbeitsprozessen	42
4.2.2	Störungen im Montageprozess	44
4.2.3	Kollaboration im gestörten Prozess	50
4.3	Informationsversorgung	53
4.3.1	Informationsbedarfe	53
4.3.2	Bewertung der Informationsquellen	55
4.3.3	Maßnahmen zur Verbesserung der Informationsversorgung	56

4.4	Anforderungen	57
4.4.1	Stufe 1: Beherrschung von Abhängigkeiten	57
4.4.2	Stufe 2: Gezielte Bereitstellung relevanter Informationen	58
4.4.3	Stufe 3: Schnelle und gezielte Kommunikation von Störungen	59
4.4.4	Stufe 4: Unterstützung einer kollaborativen Lösungsfindung	60
<b>5</b>	<b>Digitale Assistenzsysteme für kollaboratives Arbeiten</b>	<b>62</b>
5.1	Angestrebte Wirkungsweise im Zielprozess	63
5.2	Gemeinsames Situationsbewusstsein	64
5.2.1	Verortung als Informationskontext	65
5.2.2	Bereitstellung verorteter Inhalte	66
5.2.3	Anzeige und Konsolidierung verorteter Inhalte	68
5.2.4	Schaffen, Vermitteln und Nutzen eines hohen Situationsbewusstseins	69
5.3	Gezielte Informationsbereitstellung	70
5.3.1	Informationsmodellierung	71
5.3.2	Grundlagen des mobilen Assistenzsystems für Werker	72
5.3.3	Trackingverfahren für große Umgebungen	73
5.3.4	Visualisierung komplexer Geometrien	75
5.3.5	Multimodale Interaktion	80
5.3.6	Kontextbezogener Arbeitsplan	81
5.3.7	Bereitstellung von Zusatzinformationen	85
5.3.8	Aufwandsarme Fortschrittmeldung	88
5.4	Störungsdokumentation und -kommunikation	91
5.4.1	Datenmanagement	91
5.4.2	Störungsmodellierung	93
5.4.3	Aufwandsarme Störungsmeldung	94
5.4.4	Kontextsensitive Fotodokumentation	96
5.5	Kollaborative Lösungsfindung	98
5.5.1	Grundlagen des hybriden Assistenzsystems für Bauleiter	98
5.5.2	Aufgabenzuordnung auf Grundlage von Echtzeitinformationen	99
5.5.3	Entstörungsprozess	101
5.5.4	Vorverarbeitung	102
5.5.5	Sichtung	103
5.5.6	Zeitversetzte Entstörung	104
5.5.7	Entstörung in Echtzeit	105
5.6	Aufbau und Integration des Gesamtsystems	106
5.6.1	Aufbau des Gesamtsystems	107
5.6.2	Datenübernahme aus bestehenden IT-Systemen	109
5.6.3	Datenübertragung an die Assistenzsysteme	111
5.6.4	Teilintegration	113
<b>6</b>	<b>Evaluation des Gesamtsystems</b>	<b>115</b>
6.1	Bewertung der Integrationsfähigkeit in der Praxis	116
6.1.1	Fallbeispiel: Kabinenausrüstung im Flugzeugbau	117

6.1.2	Aufbau eines Testsystems	117
6.1.3	Langzeittest und Fazit	118
6.1.4	Validierung des mobilen Assistenzsystems im Trockenbau	118
6.2	Bewertung des qualitativen Nutzens im Praxiseinsatz	119
6.2.1	Fallbeispiel: Ausrüstungsmontage im Schiffbau	120
6.2.2	Expertenbefragung	120
6.3	Bewertung des quantitativen Nutzens in einer Laborumgebung	123
6.3.1	Zielsetzung und Vorgehen	124
6.3.2	Versuchsaufbau	126
6.3.3	Auswertung und Transfer der Ergebnisse	127
<b>7</b>	<b>Schlussbetrachtung</b>	<b>131</b>
7.1	Zusammenfassung	131
7.2	Ausblick	133
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>135</b>
	<b>Anhang</b>	<b>144</b>

## Abkürzungsverzeichnis

AK	Anforderungskategorie
API	Application Programming Interface
AR	Augmented Reality
BCF	Building Information Modeling Collaboration Format
BIM	Building Information Modeling
CAD	Computer-Aided Design
DSR	Design Science Research
ERP	Enterprise Resource Planning
EXIF	Exchangable Image File Format
IFC	Industry Foundation Classes
KVP	Kontinuierlicher-Verbesserungs-Prozess
o. V.	Ohne Verfasser
PLM	Product Lifecycle Management
REST	Representational State Transfer

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau der Arbeit .....	3
Abbildung 2: Design Science Research Framework, in Anlehnung an [Hevn04, S. 80] .....	3
Abbildung 3: Simultaneous Engineering in der Unikatproduktion, in Anlehnung an [Hirs92, S. 25ff.] .....	8
Abbildung 4: Anteile der Anwesenheitszeit im Schiffbau, in Anlehnung an [Tiet17, S. 127] .....	9
Abbildung 5: Prozessgestaltung in der Unikatproduktion .....	13
Abbildung 6: Verdichtung von Arbeitsgängen zur Reduzierung der Durchlaufzeit .....	13
Abbildung 7: Primär- und Sekundärstörungen .....	15
Abbildung 8: Störungsmodellierung .....	16
Abbildung 9: Störungen in verdichteten Arbeitsprozessen .....	16
Abbildung 10: Akteure der Baustellenfertigung .....	20
Abbildung 11: Abgrenzung von Zeichen, Daten, Informationen und Wissen, in Anlehnung an [Rehä96, S. 5], [Nort11, S. 40], [Krcm15, S. 12], [Leim15, S. 25], .....	21
Abbildung 12: Das Sender-Empfänger-Modell der Kommunikation, in Anlehnung an [Ulri02, S. 56ff.], [Scha12, S. 147] .....	22
Abbildung 13: Produktionsregelung, nach [Pete96, S. 35] .....	24
Abbildung 14: Benutzeroberfläche der Digitalen Arbeitsunterlage, nach [Hala18, S. 83] .....	27
Abbildung 15: Vier Stufen zur Störungsvermeidung und -bewältigung in der Unikatproduktion ...	31
Abbildung 16: Akteure im Produktionsprozess einer Werft .....	38
Abbildung 17: Informationsflüsse zwischen Hierarchieebenen auf einer Werft .....	40
Abbildung 18: Störungsauswirkung in abhängigen Arbeitsprozessen .....	43
Abbildung 19: Störungsbezogenes Aktivitätsprotokoll .....	45
Abbildung 20: Störungskategorien im Überblick .....	46
Abbildung 21: Kumulierte Störungsdauer (Materialversorgung) während einer Schicht .....	46
Abbildung 22: Tätigkeitsverteilung in der Störungskategorie Materialversorgung .....	47
Abbildung 23: Tätigkeitsverteilung in der Störungskategorie Aufgabenzuteilung .....	47
Abbildung 24: Tätigkeitsverteilung in der Störungskategorie Bauabnahme .....	48
Abbildung 25: Aufteilung nicht wertschöpfender Zeitanteile zur Entstörung .....	49
Abbildung 26: Kumulierte Klärungsdauer eines Bauleiters während einer Schicht, nach [Jahn22, S. 3] .....	51
Abbildung 27: Zeit- und Ortsbezug während der Entstörung .....	51
Abbildung 28: Anteil informatorischer Tätigkeiten bei der Entstörung durch Dritte .....	52
Abbildung 29: Modell zur Analyse der Informationsversorgung .....	53
Abbildung 30: Informationsbedarfe und Bezugsquellen .....	54
Abbildung 31: Bewertung der Informationsquellen .....	55
Abbildung 32: Überblick über das Konzept .....	62
Abbildung 33: Störungen im innovierten Prozess .....	63
Abbildung 34: Verortung von Inhalten als Kontextbezug, Grundriss nach [AIDA22] .....	66
Abbildung 35: Bewertung der Methoden zur Erstellung verorteter Inhalte .....	67
Abbildung 36: Nutzung von AR zur erweiterten Verortung .....	68
Abbildung 37: Anzeige verorteter Inhalte in AR und in 2D-Plänen .....	69
Abbildung 38: Produktionsrelevante Daten im Klassendiagramm .....	72

Abbildung 39: CAD- und AR-Unterstützung in digitalen Arbeitsunterlagen, in Anlehnung an [Frie16, S. 152].....	73
Abbildung 40: Verfahren der dynamischen Markerpositionierung.....	75
Abbildung 41: Relevanz von Ladezeit über Modellqualität, nach [Schm20, S. 50] .....	76
Abbildung 42: Unterschiedliche Modellqualität eines 3D-Modells, 3D-Modell nach [Petr19] .....	76
Abbildung 43: Bewertung der Modellqualität, nach [Schm20, S. 56ff.] .....	77
Abbildung 44: Darstellung von montagerelevanten und umgebenden Bauteilen.....	78
Abbildung 45: Verknüpfung von 2D- und 3D-Inhalten .....	79
Abbildung 46: Benutzeroberfläche zur multimodalen Interaktion .....	81
Abbildung 47: Kontextbezogener Arbeitsplan .....	84
Abbildung 48: Vorkonfiguriertes Attributset und dessen Visualisierung .....	87
Abbildung 49: Datengrundlage für den prozessbegleitenden Soll- / Ist-Abgleich .....	89
Abbildung 50: Ergebnis des prozessbegleitenden Soll- / Ist-Abgleichs .....	90
Abbildung 51: Datenaustausch in verteilten Systemen.....	92
Abbildung 52: Gegenüberstellung einzelner Datensegmente.....	93
Abbildung 53: Informationsmodell Störung .....	94
Abbildung 54: Technische Umsetzung von Störungsmeldungen durch einen Werker .....	95
Abbildung 55: Vereinfachter Meldeprozess .....	95
Abbildung 56: Automatische Objekterkennung .....	97
Abbildung 57: Informationsbedarf eines Bauleiters.....	99
Abbildung 58: Informationsgrundlage zur Arbeitspaketsteuerung.....	101
Abbildung 59: Prozessschritte zur Lösung von Störungen.....	102
Abbildung 60: Verarbeitung eintreffender Störungen .....	103
Abbildung 61: Übersicht zugeordneter Störungsmeldungen .....	104
Abbildung 62: Detailansicht einer Störungsmeldung .....	105
Abbildung 63: Übersicht akuter Störungsfälle, Grundriss nach [AIDA22] .....	106
Abbildung 64: Systemübersicht .....	108
Abbildung 65: Erweiterte Systemübersicht .....	108
Abbildung 66: Datenübernahme aus bestehenden IT-Systemen.....	110
Abbildung 67: Downloadgeschwindigkeit mittels W-Lan, 4G und 5G.....	113
Abbildung 68: Anforderungsliste und Gegenüberstellung von Messgrößen und Methoden .....	115
Abbildung 69: Evaluationsstufen .....	116
Abbildung 70: Aufbau des Testsystems .....	118
Abbildung 71: Übertragen von Installationshinweisen (2D) in den Bauraum (3D), in Anlehnung an [Rost18, S.263, 269].....	119
Abbildung 72: Anwendungsszenario: Retrofit im Schiffbau .....	120
Abbildung 73: Bewertung des Gesamtsystems (n=12).....	121
Abbildung 74: Nutzwert ausgewählter Funktionen (n=12) .....	122
Abbildung 75: Modellierung des konventionellen sowie innovierten Störungsablaufes.....	125
Abbildung 76: Durchschnittliche Störungsdauer im kombinierten Prozess (Praxis- und Versuchsumgebung).....	127
Abbildung 77: Transferszenario des innovierten Störungsprozesses (konservativ).....	129
Abbildung 78: Transferszenario des innovierten Störungsprozesses (optimistisch).....	130

# 1 Einleitung

Die Produktion von komplexen Unikaten wie Kreuzfahrtschiffen, Luxusyachten, Spezialflugzeugen oder einzigartigen Bauwerken birgt seit jeher eine Vielzahl von Herausforderungen: Anspruchsvolle Kundenwünsche und ein intakter Wettbewerb zwingen Unternehmen dazu, sich durch ausgefallene Konstruktionen von der Konkurrenz abzuheben. Zugleich ist die Durchlaufzeit des Produkts häufig ein entscheidendes Kriterium im Wettbewerb. Unikatproduzenten müssen sich den Herausforderungen innovativer und individueller Kundenwünsche daher nicht nur technisch stellen, sondern diese auch organisatorisch abbilden. Hierzu werden angepasste Strukturen und Prozesse benötigt.

Um die Komplexität zu beherrschen, streben die Unikatproduzenten seit vielen Jahren eine Dezentralisierung der Produktionsbereiche an. Einzelne Arbeitspakete werden an fachlich getrennte Gewerke ausgegliedert und im Rahmen interner oder externer Werkverträge bearbeitet. Häufig stellen z. B. externe Spezialisten die notwendigen Kompetenzen bereit, um ausgefallene Konstruktionen und Spezialeinbauten zu realisieren. Als Folge entsteht in den Baubereichen eine heterogene Struktur der beteiligten Mitarbeiter und Unternehmen. Alle Beteiligten müssen technisch und organisatorisch aufeinander abgestimmt agieren, weil die Arbeitspakete in der Regel aufeinander aufbauen. Tritt in einem der Prozesse eine Störung auf, sei es durch Fehler in der Handhabung oder Montage, durch unvorhergesehene Komplikationen oder fehlende Informationen und notwendige Rückfragen, so wirkt sich dies auch auf andere Akteure im Arbeitsbereich aus: Der Rückstand führt zu Produktivitätsverlusten durch Wartezeiten und Verzögerungen und gefährdet so auch den übergeordneten Ablaufplan und die Durchlaufzeit des Produkts.

Planerisch lässt sich der Störungsausbreitung zwar entgegenwirken, indem geeignete Puffer zwischen abhängigen Arbeitspaketen eingerichtet werden, jedoch sind dem Grenzen gesetzt, da diese die Durchlaufzeit erhöhen. Die planerischen Ansätze reichen daher nicht aus und es bedarf zusätzlicher Werkzeuge, um zum einen der Störungsentstehung entgegenzuwirken und zum anderen unvermeidbare Störungen möglichst schnell zwischen betroffenen Akteuren zu kommunizieren, sodass sich diese abstimmen und Folgestörungen vermeiden können. Selbst einfache Störungen erfordern bei individuellen und komplexen Produkten eine aufwändige Entstörung: Entscheidungsträger wie Bauleiter müssen die Situation mit ihren Abhängigkeiten verstehen, um fundiert entstörende Maßnahmen ableiten zu können. Gelingt dies nicht, können auch einfache Störungen hohe Warte- und Gezeiten, steigende Rückstände und Produktivitätsverluste in Folgeprozessen verursachen.

## 1.1 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist es, ein digitales Assistenzsystem für kollaboratives Arbeiten in der Unikatproduktion zu entwickeln, das die Prozessbeteiligten dabei unterstützt, Störungen zu vermeiden oder zumindest kurzfristig zu kommunizieren und schnellstmöglich zu entstören, um so die Effizienz des Produktionsprozesses zu verbessern und die Durchlaufzeit zu senken. Dies setzt voraus, dass die neu zu entwickelnden Werkzeuge flächendeckend eingesetzt werden können, ohne dem Einzelnen Zusatzaufwände abzuverlangen. Da Komplexität und Individualität charakteristisch für die Unikatproduktion sind, entsteht ein Zielkonflikt, den es zu lösen gilt: Die Werkzeuge müssen produktunabhängig und gewerkübergreifend einsetzbar sein, jedoch zugleich möglichst weitgehend und einfach

an individuelle Arbeitsaufgaben und Einsatzumgebungen angepasst werden können.

Zur Erfüllung dieser Zielsetzung konzentriert sich die Arbeit auf drei Teilziele: (1) eine detaillierte Analyse realer Störungsprozesse, (2) die Entwicklung individueller Assistenzsysteme für die Hauptakteure im Produktionsprozess sowie (3) die abschließende Bewertung der Lösungen.

### **1. Untersuchung von Störungen in kollaborativen Arbeitsprozessen**

Erstes Teilziel ist es zu untersuchen, wie Störungen in kollaborativen Arbeitsprozessen entstehen und wirken. Hierzu gilt es zu identifizieren, welche Störungsarten besonders häufig auftreten und was die Ursachen dafür sind. Weiter ist zu analysieren, welche Umstände im Detail dazu führen, dass sich Störungen auf Folgeprozesse ausbreiten und wie dem entgegengewirkt werden kann. Zuletzt gilt es die Vorgänge zur Entstörung zu analysieren und die zentralen Methoden zur Entstörung zu identifizieren.

### **2. Entwicklung digitaler Assistenzsysteme für kollaborative Arbeitsprozesse**

Augmented-Reality-gestützte Assistenzsysteme führen Mitarbeiter Schritt für Schritt durch Arbeitsabläufe und erhöhen sowohl die Produktivität als auch die Qualität [Frie16, S. 152]. Zweites Teilziel dieser Arbeit ist es, ein solches Assistenzsystem für die Aufgaben von Werkern in kollaborativen Arbeitsprozessen mit starken Abhängigkeiten im übergeordneten Produktionsablauf zu entwickeln. Insbesondere fehlen Werkzeuge, um Störungen mit geringem Aufwand mit den erforderlichen Informationen melden zu können. Ergänzend bedarf es einer Systematik, um Informationen, Störungen und Entstörungen im Arbeitsbereich bzw. der Umgebung des individuellen Werkers situationspezifisch und automatisch zu konsolidieren, zu verarbeiten und darzustellen.

In aller Regel sind die Bauleiter sowohl für die Werker als auch für die beteiligten indirekten Bereiche die ersten Ansprechpartner. Sie treffen in der Baustellenfertigung die operativen und zeitkritischen Entscheidungen. Die hohe Produktkomplexität und -individualität, die heterogene Struktur und die Vielzahl der beteiligten Mitarbeiter, Gewerke und Subunternehmer und das umfangreiche Aufgabenspektrum führen zu einer Vielzahl von Klärungen und Rückfragen, so dass die Bauleiter häufig überlastet sind. Es gilt daher auch die Rolle des Bauleiters zu hinterfragen und spezielle Werkzeuge bereitzustellen, um Störungsmeldungen zu filtern, zu bearbeiten und zu entstören.

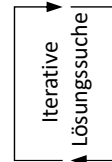
### **3. Bewertung des praktischen Nutzens**

Drittes Teilziel ist es, den Nutzen der entwickelten digitalen Assistenzsysteme für die zuvor untersuchten kollaborativen Arbeitsprozesse zu bewerten. Hierzu gilt es zu untersuchen, ob und inwiefern eine Verbesserung der Zielgrößen im Produktionsprozess erzielt werden kann. Die abschließende Bewertung gilt der Validierung des entwickelten Konzepts.

## **1.2 Vorgehen und Aufbau der Arbeit**

Der Aufbau der Arbeit lehnt sich an den allgemeinen Problemlösungszyklus des System Engineerings an [Habe12, S. 74]. Abbildung 1 zeigt den Aufbau und ordnet die Kapitel den zuvor definierten Teilzielen zu.

<b>Identifikation von Aufwänden im Störungsprozess</b>	<b>Kapitel 2: Grundlagen</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Unikatproduktion</li> <li>▪ Prozessstörungen</li> <li>▪ Kollaboratives Arbeiten</li> <li>▪ Digitale Assistenzsysteme</li> </ul>
	<b>Kapitel 3: Problemstellung und Lösungsweg</b>
<b>Entwicklung digitaler Assistenzsysteme</b>	<b>Kapitel 4: Kollaborative Arbeitsprozesse in der Unikatproduktion</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Grundlegender Arbeitsprozess</li> <li>▪ Störungen im Prozessablauf</li> <li>▪ Informationsversorgung</li> <li>▪ Anforderungen</li> </ul>
	<b>Kapitel 5: Digitale Assistenzsysteme für kollaboratives Arbeiten</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gemeinsames Situationsbewusstsein</li> <li>▪ Gezielte Informationsbereitstellung</li> <li>▪ Störungsdokumentation und -kommunikation</li> <li>▪ Kollaborative Lösungsfindung</li> <li>▪ Aufbau und Integration des Gesamtsystems</li> </ul>
<b>Bewertung der Praxistauglichkeit</b>	<b>Kapitel 6: Evaluation des Gesamtsystems</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bewertung der Integrationsfähigkeit in der Praxis</li> <li>▪ Bewertung des qualitativen Nutzens im Praxiseinsatz</li> <li>▪ Bewertung des quantitativen Nutzens in einer Laborumgebung</li> </ul>

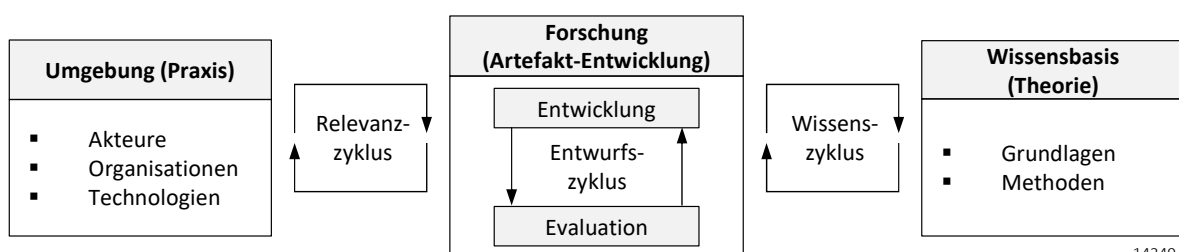


14348

Abbildung 1: Aufbau der Arbeit

Kapitel 2 gibt einen Überblick über die Grundlagen der Unikatproduktion, über Prozessstörungen, kollaboratives Arbeiten sowie über bestehende digitale Assistenzsysteme. Kapitel 3 fasst die Problemstellung zusammen und zeigt anhand zentraler Herausforderungen das Forschungsdefizit und einen konkreten Lösungsweg auf. Kapitel 4 befasst sich mit der Analyse realer, durch Abhängigkeiten und Kollaboration geprägter Arbeitsprozesse. Es werden die wesentlichen Störungskategorien in der Praxis erarbeitet und Anforderungen an die zu entwickelnden Systeme abgeleitet.

Die Entwicklung der Assistenzsysteme für Werker und Bauleiter (Kapitel 5) ist von einem hohen Praxisbezug gekennzeichnet und wurde in enger Zusammenarbeit mit verschiedenen Industrieunternehmen durchgeführt. Um die potenziellen Anwender der Systeme mit ihrem Fachwissen frühzeitig in den Entwicklungsprozess einbeziehen und die praktischen Anforderungen ableiten zu können, wurde innerhalb des Problemlösungszyklus ein agiles Vorgehen in Anlehnung an das Design Science Research Framework [Hevn04, S. 80] angewendet (vgl. Abbildung 2).



14349

Abbildung 2: Design Science Research Framework, in Anlehnung an [Hevn04, S. 80]

Der Ansatz zeichnet sich dadurch aus, dass die zu entwickelnden, meist technischen Lösungen (auch Artefakte) stetig mit den Anforderungen der späteren Einsatzumgebung (Praxis) und gleichermaßen

mit theoretischen Grundlagen und Methoden (Wissensbasis) abgeglichen werden. Ziel des Vorgehens ist es, eine wissenschaftlich fundierte Lösung für ein relevantes Problem zu entwickeln und zugleich einen theoretischen Erkenntnisgewinn zu bewirken.

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Entwicklung der Assistenzsysteme (Entwurfszyklus) und somit auf der Artefakt-Entwicklung. Die Entwicklung beruht dabei auf bestehenden Lösungen bzw. bestehendem Wissen (Wissenszyklus) und Anforderungen aus der Praxis (Relevanzzyklus). Die Tauglichkeit des Systems wird ebenfalls im Sinne des Relevanzzyklus in der Praxis evaluiert (Kapitel 6). Es werden die Integrationsfähigkeit und der qualitative Nutzen anhand realer Fallbeispiele bewertet und ergänzend eine quantitative Beurteilung mithilfe von Laborversuchen vorgenommen. Die neuen Ansätze und Methoden zur empirischen Analyse und Interpretation von Arbeitsprozessen von Bauleitern und Werkern schaffen zudem einen theoretischen Erkenntnisgewinn im Sinne des Wissenszyklus und leisten einen Beitrag zur Verbreiterung der Wissensbasis.

## 2 Grundlagen

Das zweite Kapitel befasst sich mit den relevanten Grundlagen sowie dem Stand der Technik des Themenfelds. Es werden zunächst die Gegebenheiten und Herausforderungen der Unikatproduktion beleuchtet (Abschnitt 2.1). Anschließend werden die relevanten Arten und Wirkungsweisen von Prozessstörungen (Abschnitt 2.2) und die speziellen Herausforderungen kollaborativer Arbeitsweisen diskutiert (Abschnitt 2.3). Zuletzt wird der aktuelle Stand digitaler Assistenzsysteme aus unterschiedlichen Bereichen untersucht (Abschnitt 2.4).

### 2.1 Unikatproduktion

Die Unikatproduktion bezeichnet die einmalige Herstellung eines einzigartigen Produkts [Hirs92, S. 16], [Adam98, S. 22], [Berg95, S.6], [Hirs92, S. 16]. Klassische Beispiele für Unikatprodukte sind Kreuzfahrtschiffe, Yachten, Gebäude oder auch Privat- und Regierungsflugzeuge. Die hohe Individualität der Produkte führt sowohl in indirekten als auch direkten Bereichen der Produktion zu Herausforderungen. Nachfolgend werden zunächst die Zielgrößen der Unikatproduzenten diskutiert und Schwerpunkte für den weiteren Verlauf der Arbeit bestimmt (Abschnitt 2.1.1). Verschiedene Aspekte, die für die Unikatproduktion charakteristisch sind (Abschnitt 2.1.2), erschweren die Anwendung gängiger Strategien (Abschnitt 2.1.3) zur Verbesserung der Zielgrößen.

#### 2.1.1 Zielgrößen

Zeit, Kosten und Qualität sind die primären Zielgrößen, anhand derer sich Unternehmen von Wettbewerbern differenzieren [Töpf09, S.3ff.], [Lödd14, S. 23]. Durch Innovationen lassen sich diese Zielgrößen positiv beeinflussen und so Wettbewerbsvorteile erzielen [Krüg06, S. 117]. Gegenseitige Abhängigkeiten zwischen den Zielgrößen führen dazu, dass die Bewertung von Innovationen stets alle drei Größen berücksichtigen muss [Hors03, S. 21]. Im Folgenden werden daher die drei zentralen Zielgrößen differenziert und ein Fokus für den weiteren Verlauf dieser Arbeit gelegt.

#### **Zeit: Durchlaufzeit und Termintreue**

Dem Faktor Zeit kommt in der Unikatproduktion eine besondere Bedeutung zu: Der Liefertermin ist neben der Produktspezifikation und dem Preis elementarer Bestandteil des Vertrages zwischen Kunde und Produzent und zugleich insbesondere in der Unikatproduktion ein wichtiges Verkaufsargument. Mit dem Liefertermin wird zur Vertragsunterzeichnung auch die maximale Durchlaufzeit festgelegt [Haux21, S. 7]. Weiter hat die Einhaltung des vereinbarten Liefertermins (Termintreue) insbesondere in der Unikatproduktion einen sehr hohen Stellenwert [Grab14, S. 1]: Die Fertigstellung einzelner Baubereiche ist Grundlage vereinbarter Zahlungsmeilensteine [Schm14, S. 312] und beeinflusst unmittelbar die Liquidität des Produzenten während der Produktionsphase. Kommt es zu Verzögerungen bei der Auslieferung, führt dies in der Regel zu hohen Verzugskosten und einem gravierenden Vertrauensschaden [Lödd16 S. 41]. Des Weiteren wirkt sich Verzug in der Regel auf Folgeprozesse aus, weil die Kapazitäten länger als geplant für das verzögerte Projekt gebunden sind und daher nicht rechtzeitig für Folgeprojekte bereitstehen.

### Kosten: Produktivität und Bestand

Die Produktivität ist für viele Unternehmen eine besonders wichtige Zielgröße. Sie ist definiert als das Verhältnis zwischen Output und Input eines Arbeitssystems [Bokr06, S. 41]. Für Unternehmen mit einem hohen Anteil manueller Tätigkeiten gilt die Arbeitsproduktivität als Teil der (Gesamt-)Produktivität als wichtigste Ausprägung [Glöc17, S. 1]. Da sich in der Unikatproduktion der Output in Form von Gutteilen nur schwer quantifizieren lässt, kann alternativ die **Arbeitsproduktivität** als Verhältnis von produzierten Vorgabestunden (Output) zu bezahlten Mitarbeiterstunden (Input) verwendet werden [Hala18, S. 23].

$$\text{Arbeitsproduktivität} = \frac{\text{produzierte Vorgabestunden}}{\text{bezahlte Mitarbeiterstunden}}$$

Hohe Bestände von freigegebenen, aber noch nicht fertiggestellten Aufträgen (Fertigungsbestand) sowie von Rohmaterial, Halbfabrikaten und Fertigwaren (Lagerbestand) wirken sich aufgrund gebundenen Kapitals negativ auf die Finanzen des Produzenten aus [Lödd16, S. 36]. Die Produktion komplexer Unikate ist für gewöhnlich von einer Baustellenfertigung geprägt. Um insbesondere in späten Produktionsphasen das Risiko fehlenden Materials zu verringern, halten viele Unternehmen hohe Bestände halbfertiger Baugruppen möglichst nah am Einbauort vor. Dies wiederum ist vor dem Hintergrund begrenzter Flächen ein großes Problem. Hohe Bestände bedeuten daher neben finanziellen Nachteilen auch eine organisatorische Herausforderung.

### Qualität

Auf dem europäischen Markt genießt Qualität als Zielgröße einen besonderen Stellenwert und ist für die Kaufentscheidung des Kunden ein wichtiger Maßstab. In der Unikatproduktion wird das erforderliche Qualitätsniveau des Endprodukts in aller Regel nicht infrage gestellt. Allenfalls wird diskutiert, wie man den erforderlichen Aufwand reduzieren kann, um das Qualitätsziel zu erreichen. Werden Abweichungen vom notwendigen Qualitätsniveau frühzeitig erkannt, können diese unmittelbar behoben werden. Decken hingegen erst späte Qualitätskontrollen die Probleme auf, folgen erheblich größere Nacharbeiten, die mitunter zeit- und kostenwirksam sein können [Winz15, S. 8]. Halata führt an, dass die qualitätsbedingten Produktionsaufwände (Nacharbeiten) in hohem Maße von der Gestaltung der Informationsversorgung für die Produktionsmitarbeiter abhängen [Hala15, S. 30]. Durch eine gut gestaltete Informationsversorgung können Probleme frühzeitig vermieden bzw. aufgedeckt und die hohen Folgekosten vermieden werden.

### Fokus dieser Arbeit

Es lässt sich nur schwer eine Priorisierung der genannten Zielgrößen vornehmen, da stets das Gleichgewicht ausschlaggebend für den wirtschaftlichen Erfolg des Unikatproduzenten ist. Nichtsdestotrotz bestehen im weltweiten Vergleich von Wettbewerbern unterschiedliche Stärken und Schwächen. So kommt es, dass beispielsweise der deutsche Schiffbau als schnell, termintreu und qualitativ hochwertig angesehen wird, jedoch zugleich als hochpreisig gilt [Ludw20, S. 13]. Wie zuvor erläutert, stellt insbesondere die Produktivität einen wichtigen Stellhebel zur Reduzierung der aufzuwendenden Kosten dar. Auch zeigt sich, dass kurze Durchlaufzeiten mehr Flexibilität im Produktionsprozess ermöglichen und die Gefahr von Konventionalstrafen durch Lieferverzug reduzieren können.

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit gilt ein besonderes Augenmerk daher der Verkürzungen von Durchlaufzeiten und der Verbesserung der Arbeitsproduktivität ohne Gefährdung qualitativer Aspekte.

### 2.1.2 Merkmale

Die Unikatproduktion unterscheidet sich in vielen Punkten von der Serienfertigung. Der folgende Abschnitt diskutiert ihre wichtigsten Merkmale und stellt die bedeutenden Stellhebel für Prozessinnovationen vor.

#### Hohe Produktkomplexität und -individualität

Kreuzfahrtschiffe, Yachten, Gebäude oder auch Privat- und Regierungsflugzeuge sind von einer überaus hohen technischen Komplexität gekennzeichnet. Bei einem 350 Meter langen Kreuzfahrtschiff werden beispielsweise über drei Jahre bis zu 10 Millionen Einzelteile verbaut [Seew15]. Ein wesentlicher Bestandteil des Wettbewerbs ist die Fähigkeit, auch außergewöhnliche Kundenwünsche zu realisieren [Frie16, S. 1]. Dies bedeutet neben einer hohen Produktkomplexität auch eine hohe Individualität bzw. Einzigartigkeit. Da die produktionsrelevanten Daten und Informationen für jedes Produkt neu erstellt werden müssen [Spec09, S. 37], ergeben sich hohe Aufwände in vorgelagerten Bereichen wie der Konstruktion und der Arbeitsvorbereitung. Um die Wirtschaftlichkeit des Prozesses zu gewährleisten, gilt es, diese Aufwände gering zu halten, denn anders als in der Serienfertigung lassen sich die entstehenden Aufwände nicht durch hohe Stückzahlen rechtfertigen. Unikatproduzenten streben daher an, Teilprozesse bzw. Teilkomponenten des Produkts zu standardisieren. Insbesondere in Bereichen, die für den Endkunden beim Betrieb bzw. der Nutzung des Produkts verborgen bleiben bzw. für diesen nicht relevant sind, gelingt dieser Ansatz: Der Stahlbau im Schiffbau [Rose17, S. 2], [Lead20, S.12] oder das Bauhauptgewerbe im Bauwesen sind daher von einem hohen Grad der Standardisierung geprägt: Baukasten- und modulare Montagesysteme kommen zum Einsatz und ermöglichen es trotz der kundenindividuellen Konfiguration einzelner Elemente, mit geringem Aufwand spezifische Produktionsunterlagen abzuleiten und auf bekannte Montageabläufe zurückzugreifen.

Für Bereiche bzw. Bauelemente, die für den späteren Kunden unmittelbar sichtbar sind, lässt sich dieser Ansatz nur bedingt anwenden. Die individuell angefertigten Bauteile erfordern hier häufig auch neuartige Montageprinzipien und unterliegen zugleich hohen Qualitätsanforderungen (z. B. in Bezug auf Spaltmaße). Diese im Schiffbau als Ausrüstung bezeichnete Bauphase trägt aufgrund ihrer Komplexität zu einem Anteil von bis zu 70% zur Wertschöpfung bei [Bund21, S. 27] [Lead20, S. 12], [Ludw14, S. 9]. Im Bauwesen verursacht das inhaltlich vergleichbare Ausbaugewerbe mit 36% des Bauvolumens, neben dem Bauhauptgewerbe (31,7%) und dem Anteil übriger Produzenten (32,3%) den höchsten Anteil an der Wertschöpfung [Bund19, S. 19]. Begründet liegt dies wiederum in der erhöhten Komplexität und Individualität der Ausrüstungskomponenten.

Wegen der hohen Kosten ist es zudem für den Großteil der Komponenten unwirtschaftlich, Prototypen anzufertigen. Vielmehr muss die Qualität des Produkts bzw. der Komponenten auf Anhieb in angemessener Weise realisiert werden [Hirs92, S. 20].

### Simultaneous Engineering

Aufgrund langer Durchlaufzeiten für die Entwicklung und Produktion der komplexen Unikatprodukte ist ein sequenzieller Ablauf von Teilprozessen nicht sinnvoll [Gruß10, S. 78]. Die Prozesse werden parallelisiert (vgl. Abbildung 3), sodass die Mitarbeiter der Produktion unmittelbar nach Fertigstellung einzelner Fertigungsunterlagen mit der Herstellung erster Baugruppen beginnen können.

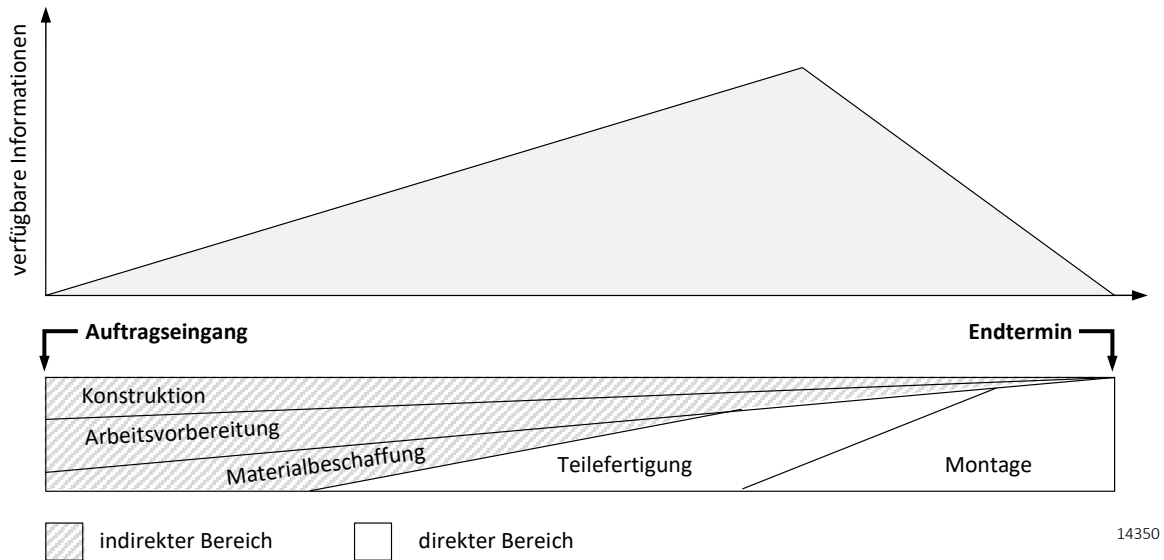


Abbildung 3: Simultaneous Engineering in der Unikatproduktion, in Anlehnung an [Hirs92, S. 25ff.]

In vielen Fällen ändert der Kunde die Produktspezifikation noch nach Beginn der Konstruktion [Gruß10, S. 78]. Dies führt dazu, dass Entwicklungsprozesse häufigen und kurzfristigen Änderungen unterliegen, die unweigerlich Einfluss auf nachgelagerte Prozesse nehmen [Tu11, S. 67]. Der simultane Ablauf der einzelnen Prozessphasen ermöglicht es zwar, diese Änderungen zeitnah in den Produktionsprozess einzusteuern, führt jedoch zu häufigen Änderungen der (oft papierbasierten) Fertigungsunterlagen. Die Erstellung und Bearbeitung fertigungstechnischer Unterlagen erstreckt sich durch diesen Ansatz des Simultaneous Engineerings über den gesamten Zeitraum der Auftragsabwicklung [Kuhl94, S. 20ff.].

### Flexible Fertigungsprozesse

Eine weitere Folge der stark individualisierten Produkte ist die Notwendigkeit flexibler Fertigungsprozesse sowie Produktionstechnologien [Gruß10, S. 79]. Es liegt in der Regel eine Kombination aus Werkstatt- und Baustellenfertigung vor [Hirs92, S.10]: Die Fertigung von Einzelteilen und deren Vormontage zu einzelnen Modulen finden in Werkstätten (bei Zulieferern) statt. Erst die spätere Integration in das Endprodukt erfolgt im Zuge der Endmontage auf der Baustelle. Dieser Ansatz ermöglicht es, Module weitestgehend produktunabhängig herzustellen und begünstigt somit Standardisierungen in weiten Teilen der Wertschöpfungskette [Stal01, S. 67]. In der Endmontage steigt die Individualität sprunghaft an, da die Module bei jedem Produkt neu kombiniert werden. Gleichermäßen sprunghaft steigt die Prozesskomplexität an, da unterschiedliche Module diverser Hersteller auf engem Raum in straffen Zeitplänen zum Endprodukt zusammengefügt werden müssen. Die Vorverla-

gerung wesentlicher Anteile der Wertschöpfung in Werkstätten ermöglicht es, den beengten Platzverhältnissen in der Baustellenfertigung zu entgehen, Arbeiten somit stärker zu parallelisieren und die Produktivität zu steigern.

Auch wenn die Produkte sehr individuell sind, gleichen sich die Fertigungs- und Montageabläufe in der Regel und viele Unternehmen setzen flexible Standardbetriebsmittel ein. Im Vergleich zur Großserienfertigung dominieren jedoch in vielen Bereichen manuelle Tätigkeiten und der Automatisierungsgrad ist deutlich geringer.

### Hoher Informationsbedarf und niedrige Produktivität

Durch den hohen Anteil manueller Tätigkeiten liegt grundsätzlich ein erhöhter Bedarf an Fertigungsinformationen vor [Hala18, S. 6]. Ein wesentliches Merkmal des gegenwärtigen Simultaneous Engineering ist jedoch, dass ein Großteil der erforderlichen Informationen zum Fertigungsstart noch nicht verfügbar ist, sondern produktionsbegleitend erstellt wird (vgl. Abbildung 3). Mitarbeiter müssen daher eine hohe kognitive Leistung zur Interpretation der (wenigen) verfügbaren Informationen leisten [Hala18, S. 7]. Im Falle unvollständiger Informationen führt dies zu hohen Nebenzeiten in Form von Suchaufwänden [Tiet17, S. 6ff.] bzw. zu ungeplanten und vielfach aufwändigen Prozessen zur Beschaffung der fehlenden Informationen [Frie16, S. 157], [Tiet17, S. 127] (vgl. Abbildung 4).

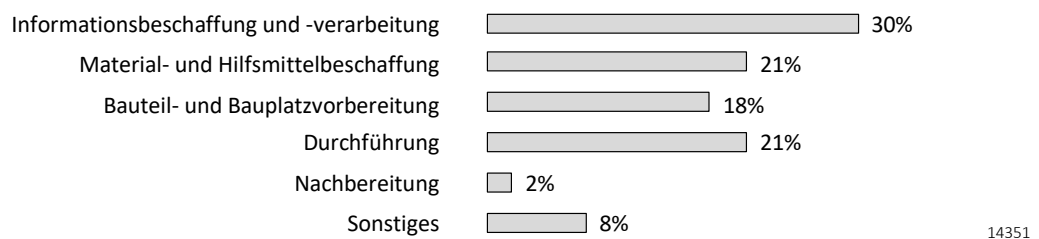


Abbildung 4: Anteile der Anwesenheitszeit im Schiffbau, in Anlehnung an [Tiet17, S. 127]

Obige Abbildung zeigt exemplarisch die Ergebnisse umfangreicher Multimomentaufnahmen zur Analyse der Anwesenheitszeit von Werkern der Montage einer schiffbaulichen Unikatproduktion. Tietze konnte nachweisen, dass die Werker ca. 30% ihrer Anwesenheitszeit mit der Beschaffung bzw. der Verarbeitung von Informationen verbringen und nur ca. 20% mit der eigentlichen Durchführung wertschöpfender Tätigkeiten.

### Geringe Eigenfertigungstiefe und viele Prozessbeteiligte

Um die hohe Produktkomplexität zu bewältigen, streben Unikatproduzenten eine Dezentralisierung der Produktion an [Kuhl94, S. 57ff.]. Insbesondere in der Ausrüstungsmontage sind viele Kompetenzen notwendig, sodass viele Gewerke verzahnt zusammenarbeiten [Wei12, S. 17]. Klassischerweise haben Unikatproduzenten des Maschinen- und Anlagenbaus hierbei dennoch eine hohe Eigenfertigungstiefe. Dies liegt begründet in dem hohen Anteil von manuellen Arbeitsprozessen, der hohen technischen Komplexität und dem damit verbundenen Spezialwissen sowie den Risiken hinsichtlich Liefertreue, Qualität sowie Know-how-Verlust [Gruß10 S. 160ff.]. In der Luftfahrtindustrie dominieren in der Fragestellung der Fremdvergabe zusätzlich besonders hohe Anforderungen an Qualität

und Qualifikation hinsichtlich der luftfahrtrechtlichen Zulassungsprozesse [Hins12, S.250 ff.]. Langfristige Kooperationen mit Lieferanten und deren Entwicklung und Integration bieten jedoch grundsätzlich das Potenzial, die Lieferkette störungsrobuster zu gestalten [Gruß10, S. 160ff.].

Große Bauunternehmen fungieren in der Regel als Generalunternehmer. Sie verfügen häufig über Kompetenzen in der Konstruktion sowie der Planung und sind Hauptvertragspartner eines Bauherrn. Sie übernehmen in dieser Funktion die Vergabe von Arbeitsinhalten in Form von Werkverträgen an Arbeitsgemeinschaften, die wiederum aus einzelnen Subunternehmern für die jeweiligen Gewerke bestehen [Leim17, S. 46ff.]. Auch Unternehmen des Schiffbaus beschränken sich vermehrt auf die Kernkompetenz (in der Regel Engineering und Zertifizierung) sowie die operative Projektleitung und versuchen durch die verstärkte Vergabe von Unteraufträgen, Produkte höherer Komplexität und Qualität herzustellen [Rose17, S. 14].

Als Folge der Fremdvergabe reduziert sich das allgemeine Planungsproblem der Prozessabläufe auf einfacher zu handhabende Teilprobleme [Kuhl94, S. 32]. Auf der anderen Seite wächst jedoch die Heterogenität der Prozessbeteiligten. Der Wertschöpfungsprozess verteilt sich über eine Vielzahl von Unternehmen, deren Zusammensetzung sich in der Regel bei jedem Projekt ändert [Borr15, S. 3]. Beispielsweise erfolgt die Wertschöpfung im deutschen Schiffbau zu 70% durch Zulieferbetriebe [Bund21, S. 27], [Lead20, S. 12], [Ludw14, S. 9], wobei dies eine Vielzahl von KMU einschließt [IHKR20, S. 2]. Die Unikatproduktion ist wegen der vielen Abhängigkeiten sehr störungsanfällig, so dass steuernde Maßnahmen schnell eingeleitet werden müssen [Laur98, S. 543].

### Hohe Unsicherheiten

Die hohe Produktkomplexität und die Informationsdefizite insbesondere in frühen Phasen der Auftragsabwicklung führen bereits in der Produktionsplanung zu zahlreichen Unsicherheiten [Haux21, S. 1], [Gruß10, S. 156]. Herstellungsaufwände lassen sich aufgrund des Neuheitsgrads nur abschätzen. Maßgebend für die Festlegung der Aufwände und spezifischen Produktionsabläufe ist häufig das Erfahrungswissen der operativen Mitarbeiter [Gruß10, S. 90]. Diese müssen für kurzfristige Änderungen oder unerwartete Komplikationen schnell konstruktive Lösungen finden. In der Regel sind es auch die Werker, die Optimierungspotenziale in der Auftragsplanung und -ausführung erkennen [Gruß10, S. 99]. Sie nehmen aus diesen Gründen in der Unikatproduktion eine zentrale Rolle dabei ein, den Folgen von Unsicherheiten entgegenzuwirken. Es bedarf transparenter Fertigungsprozesse, um beispielsweise Ressourcenengpässe frühzeitig erkennen und die Planung entsprechend anpassen zu können.

### Abhängigkeiten im Produktionsprozess

Durch die Ausgliederung von Fachdisziplinen an einzelne (unternehmensinterne oder auch -externe) Gewerke und das Bestreben, den einzelnen Arbeitsprozessen ein hohes Maß an Autonomie zuzusprechen, ergeben sich Abhängigkeiten zwischen den Prozessbeteiligten. Die Abhängigkeiten zwischen mehreren Arbeitsprozessen lassen sich im Wesentlichen in zwei Kategorien einteilen:

**Ressourcenbedingte Abhängigkeiten** treten auf, wenn mehrere Prozessbeteiligte dieselben (begrenzten) Ressourcen benötigen. Insbesondere eine Baustellenfertigung erfordert die gemeinsame

Nutzung von Zugängen, Verkehrsflächen im Bauraum, Fahrstühlen, Lagerflächen oder Transportmitteln (z. B. Krane an einem Dock). Beispielsweise können Boden- und Deckenarbeiten, obwohl technisch meist keinerlei Abhängigkeiten bestehen, nicht zeitgleich stattfinden, da in beiden Fällen dieselbe Arbeitsfläche benötigt wird. Werften ordnen aus diesem Grund jedem Prozessbeteiligten Zeitfenster zur Montage von Einbauten in bestimmten Bereichen zu [Rose17, S. 3]. Kommt es in einem Zeitfenster zu einer Verspätung, kann sich schnell eine Kaskade von Verzögerungen ergeben [Sepp18, S. 194]. Je nach Puffer zwischen den Arbeitspaketen können gleich mehrere Folgeprozesse betroffen sein. Verzögerungen in Folgeprozessen können auch Strafzahlungen (bzw. Lohnfortzahlung für die nicht abgerufene Arbeitsleistung) nach sich ziehen und wirken sich somit negativ auf die Kosten aus.

**Prozessbedingte Abhängigkeiten** ergeben sich, wenn das Arbeitsergebnis eines Beteiligten von der erfolgreichen Fertigstellung eines anderen abhängt. Beispielsweise müssen vor der Montage von Deckenpaneelen die dahinterliegenden Elektroleitungen verlegt werden. Verzögern sich in diesem Beispiel die Elektroarbeiten, führt dies auch zu einer Verzögerung der Deckenarbeiten. Noch problematischer wird es, wenn die Qualität eines Arbeitsprozesses von der Qualität eines vorangegangenen abhängt. Ein geläufiges Beispiel hierfür sind verkettete Fertigungstoleranzen: Die lichte Breite einer Kabine wird durch die Position der Wandpaneele (Innenausbau) definiert. Diese Position hingegen wird maßgeblich von der darunterliegenden Struktur (Ergebnis des Stahlbaus / Strukturbaus) beeinflusst. Abweichungen in der Struktur haben somit qualitätswirksame Folgen für die Montage der Wandpaneele. Dies ist besonders kritisch, wenn die beiden Arbeitsprozesse von unterschiedlichen Subunternehmern ausgeführt werden und ersterer zu Lasten des letzteren die Fertigungstoleranzen ausschöpft, um z. B. Kosten zu sparen. Insbesondere in Unternehmen mit einer geringen Eigenfertigungstiefe (Schiffbau, Bauwesen) sind qualitätswirksame Abhängigkeiten ein hohes Risiko: Sind Subunternehmer unachtsam, nicht ausreichend qualifiziert [Gron19, S. 34] oder verfügen diese nur über sehr enge Margen [Tam11, S. 110], kommt es häufig zu Abweichungen von Qualitätsvorgaben.

### 2.1.3 Strategien zur Verbesserung der Zielgrößen

Eine hohe Produktivität, kurze Durchlaufzeiten sowie geringe Abweichungen von dem zugesagten Liefertermin sind primäre Zielgrößen der Unikatproduktion (vgl. Abschnitt 2.1.1). Die genannten Merkmale der Unikatproduktion wirken einer Optimierung dieser Zielgrößen entgegen: Eine hohe Produktkomplexität sowie -individualität sorgen für hohe Unsicherheiten in der Planung und Durchführung der Produktionsprozesse. Zwar können große Puffer zwischen einzelnen Arbeitsgängen die Auswirkungen von Störungen im Ablauf minimieren. Dies würde sich jedoch negativ auf die Durchlaufzeit auswirken. Zur Lösung des Zielkonfliktes bestehen grundsätzlich drei Strategien, die im Folgenden diskutiert werden.

#### Standardisierung von Baugruppen

Die gezielte Standardisierung auf Einzelteilebene und die Bildung von standardisierten Baukästen (Modularisierung) [Gruß10, S. 111ff.] kann die Komplexität bzw. Individualität des Gesamtprodukts stark reduzieren und den damit verbundenen negativen Effekten entgegenwirken. Die Strategie wird insbesondere bei technisch aufwändigen Großkomponenten wie beispielsweise Antriebsmaschinen,

Generatoren oder Heizanlagen angewandt. Modulare Montagesysteme ermöglichen es auch Baugruppen wie beispielsweise Kabel- und Klimaschächte zu standardisieren, obwohl diese in jedem Bauprojekt individuell ausgestaltet sind. Häufig sind insbesondere funktionale Bereiche und Baugruppen, die für den Kunden nicht sichtbar sind, auch bei Unikaten in hohem Maße standardisiert. Dagegen sind für den Kunden sichtbare Bereiche, insbesondere wenn sie das Erscheinungsbild des Produkts prägen, in der Regel Spezialanfertigungen und wirkliche Einzelstücke, sodass Standardisierung hier nur bedingt als Strategie angewendet werden kann.

### **Standardisierung von Prozessen**

Betrachtet man (unabhängig der Produktbestandteile) die in der Montage durchgeführten Tätigkeiten, so fällt auf, dass diese eine hohe Standardisierung aufweisen: Als Beispiel macht es für einen Küchen- oder Montagebauer nur einen geringen Unterschied, welche Farben oder Formen zu installierende Schrankfronten haben oder wie diese angeordnet sind. Die Montagehandgriffe sind stets identisch. Gleiches lässt sich für viele andere, direkt an der Wertschöpfung beteiligte Gewerke feststellen. Da der übergeordnete Zusammenhang der Tätigkeiten hingegen bei jedem neuen Produkt einzigartig ist, liegt die zentrale Herausforderung in der Organisation der vielen, einzelnen Arbeitsgänge.

### **Parallelisierung von Arbeitsgängen**

Wie in Abschnitt 2.1.2 angeführt, finden die wertschöpfenden Arbeiten der Unikatproduktion sowohl in Werkstätten als auch auf der zentralen Baustelle statt. Weitere Formen sind externe Baustellenfertigungen für die Vorfertigung autarker Baubereiche (z. B. Blockbau im Schiffbau) und auch die Linienfertigung von standardisierten Modulbaugruppen wie Fertigkabinen im Kreuzfahrtschiffbau.

Wie in vorigem Abschnitt erläutert, lassen sich Abhängigkeiten zwischen einzelnen Arbeitsprozessen in ressourcenbedingte (z. B. wenn derselbe Bauraum benötigt wird) und prozessabhängige (z. B. wenn ein Teilprozess bestimmte Vorarbeiten voraussetzt) einteilen. Vor diesem Hintergrund ist die Fertigungsart eines Teilprozesses zunächst nicht relevant, viel wichtiger ist, ob Teilprozesse örtlich und zeitlich unabhängig sind.

Abbildung 5 stellt diesen Zusammenhang sowie Treiber und Randbedingungen der zeitlichen und örtlichen Organisation von Teilprozessen dar. Es bestehen zahlreiche Gründe für die örtliche Verlagerung von Wertschöpfung: Beispielsweise lässt sich mit weitaus weniger Aufwand eine effiziente Materialversorgung gewährleisten. Manuelle Arbeitsplätze lassen sich ergonomischer gestalten und die Voraussetzungen für den Einsatz von Infrastruktur wie Kräne, Industrieroboter und Flurförderzeuge lassen sich leichter realisieren. Aufgrund des dezentral verfügbaren Platzes könnte eine Vielzahl von Arbeitsgängen parallel stattfinden (vgl. Abbildung 5, Quadrant I). Bauen die Arbeitsgänge jedoch aufeinander auf (prozessbedingte Abhängigkeit), so müssen sie trotz räumlicher Trennung zeitlich nacheinander stattfinden (Quadrant II). In diesem Fall erfordert die örtliche Trennung Logistikaufwände, die wiederum mit Abstimmungsprozessen einhergehen.

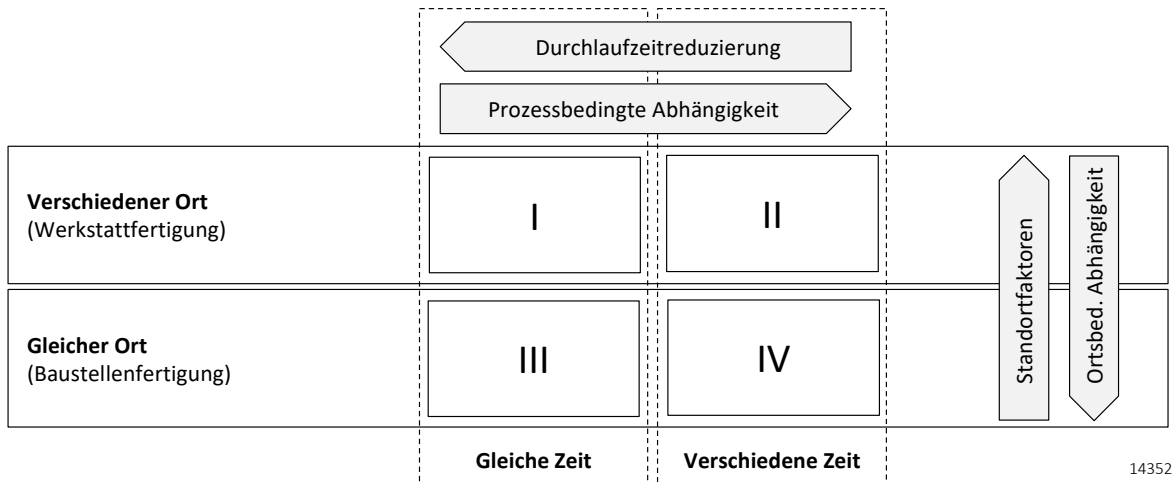


Abbildung 5: Prozessgestaltung in der Unikatproduktion

Ab einem bestimmten Zeitpunkt werden die vorgefertigten Baugruppen in das Gesamtprodukt auf der zentralen Baustelle integriert. Dadurch entstehen örtliche Abhängigkeiten und bei gleichzeitiger Durchführung unterschiedlicher Arbeiten am selben Ort (Quadrant III) somit ein erhöhtes Risiko für gegenseitige Störungen im Prozessablauf. Die einzige Möglichkeit, die Einbausituation zu entspannen, ist eine zeitliche Entkopplung der Arbeitsgänge (Verschiebung in Quadrant IV). Da die Umfänge der einzelnen Arbeitsgänge einer Unsicherheit unterliegen, ist es üblich, Puffer einzuplanen. Diese können Verzögerungen im Ablauf zwar begrenzen, verlängern jedoch die Durchlaufzeit (vgl. Abbildung 6, links).

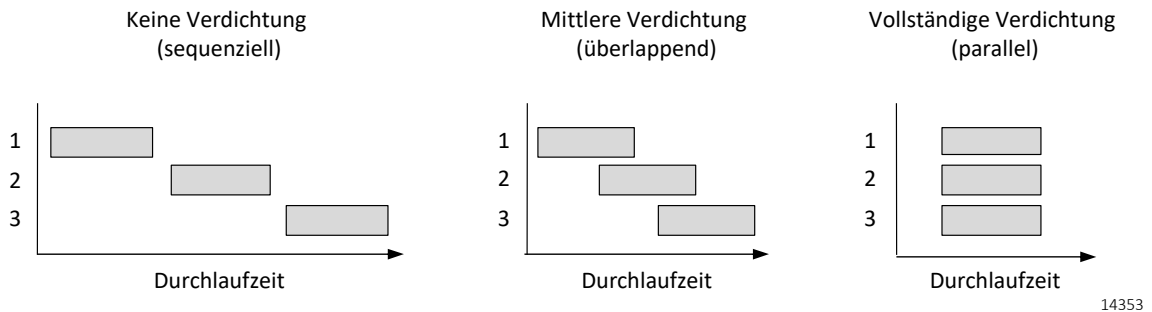


Abbildung 6: Verdichtung von Arbeitsgängen zur Reduzierung der Durchlaufzeit

Wie zuvor beschrieben, ist eine vollständige Verdichtung der Tätigkeiten (Parallelisierung, Abbildung 6, rechts) aufgrund der prozessbedingten Abhängigkeiten in der Praxis jedoch nicht möglich. Infolgedessen entstehen Mischformen (vgl. Abbildung 6, mittig): Arbeitsgänge, die prozessbedingt nicht notwendigerweise nacheinander stattfinden müssen, lassen sich so weit verdichten, bis die verfügbaren Verkehrsflächen ausgeschöpft sind. Es entsteht eine teilweise Überlappung einzelner Arbeitsgänge, wobei sich die daran beteiligten Gewerke miteinander arrangieren bzw. kollaborieren müssen. Der primäre Stellhebel zur Reduzierung der Durchlaufzeit ist schließlich der Grad der Verdichtung. Insbesondere in der Unikatproduktion stellt dies vor dem Hintergrund hoher Unsicherheiten, der hohen Produktkomplexität sowie hoher Anforderungen von Gesetzgebern, Behörden und Kunden [Hins19, S. 269] eine Herausforderung dar. Es stellt sich zudem die Frage, welche Risiken bestehen, wenn der Verdichtungsgrad weiter gesteigert wird. Der folgende Abschnitt greift diese

Fragestellung auf und diskutiert Prozessstörungen im Allgemeinen sowie dessen Ausbreitung in abhängigen Produktionsprozessen im Speziellen.

## 2.2 Prozessstörungen

Weicht der Ablauf einer Montage unbeabsichtigt und unerwünscht von der geplanten und erwarteten Abfolge der Tätigkeiten ab, so spricht man von einer Störung [Kim95, S. 3]. In manuellen Montagen sind Störungen einer der Hauptgründe für ungeplante Unterbrechungen der Montagetätigkeiten [REFA97, S. 23].

Für eine vertiefte Betrachtung von Prozessstörungen im Kontext der Unikatproduktion werden im Folgenden zunächst unterschiedliche Störungsarten und -ursachen (Abschnitt 2.2.1) diskutiert. Abhängigkeiten zwischen Prozessen führen dazu, dass sich Wirkung von Störungen schnell ausbreitet (Abschnitt 2.2.2). Der letzte Abschnitt konzentriert sich abschließend auf den Umgang mit Störungen (Abschnitt 2.2.3).

### 2.2.1 Störungsarten und -ursachen

Veränderungen der Produkte und Prozesse, Fehler sowie Abweichungen aus instabilen Prozessen oder auch Verfügbarkeits- und Leistungsschwankungen der personellen oder maschinellen Ressourcen sind häufige Ursachen von Störungen [West14, S. 17]. In Bezug auf die Unikatproduktion liefert eine Betrachtung der konkreten Arbeitsprozesse tiefergehende Einblicke: Mit dem generischen Arbeitszyklus definiert Tietze für Arbeitsabläufe in direkten Bereichen fünf Phasen [Tiet17, S. 37]: Informationsbeschaffung und -verarbeitung, Material- und Hilfsmittelbeschaffung, Bauteil- und Bauplatzvorbereitung, Durchführung und Nachbereitung. Die direkte Wertschöpfung findet in der Durchführungsphase statt [Tiet17, S. 42], wobei die anderen Phasen zumindest teilweise für die Wertschöpfung erforderlich sind. Hohe Zeitanteile in diesen nicht unmittelbar wertschöpfenden Arbeitsphasen verringern allerdings die verfügbare Zeit für direkt wertschöpfenden Tätigkeiten und wirken sich somit negativ auf die Produktivität aus (vgl. auch [Glöc20, S. 53ff.]).

Im Sinne obiger Definition sowie der Betrachtungen von Tietze [Tiet17, S. 42ff.] und Glöckner [Glöc20, S. 55] lassen sich im Wesentlichen vier Ursachen für Störungen in manuellen Arbeitsabläufen identifizieren:

1. Fehlende Informationen
2. Fehlende Materialien und Hilfsmittel
3. Unvorbereitete Bauteile und Bauplätze
4. Aufwändige Nacharbeiten

Hinzu kommen prozessunabhängige Ursachen, wie geplante oder ungeplante Abwesenheiten von Mitarbeitern (beispielsweise durch Krankheit) [Glöc20, S. 53ff.].

Betrachtet man Störungen vor dem Hintergrund abhängiger Arbeitsprozesse, so ist eine Unterscheidung in Primär- und Sekundärstörung notwendig (vgl. Abbildung 7). **Primärstörungen** treten aufgrund oben genannter Ursachen auf und führen zu Stillstand in einem Teilprozess. **Sekundärstörun-**

gen entstehen hingegen durch Fortpflanzung einer solchen Primärstörung aufgrund von Abhängigkeiten zu anderen Teilprozessen. Olsson beschreibt in diesem Kontext die Situation abhängiger Subunternehmer auf einer Baustelle als „zu viele Leute zur falschen Zeit am selben Ort“ [Olss98, S. 503]. Er beschreibt die defizitäre Situation in der Produktion von Unikaten (repräsentativ am Beispiel des Bauwesens) damit sehr plakativ und benennt ein zentrales Problem: Unabhängige (interne oder externe) Prozessteilnehmer arbeiten am selben Ort, benötigen dieselben Arbeits- und Stellflächen sowie dieselben zentralen personellen oder maschinellen Ressourcen.

Aufgrund der Vielzahl von Schnittstellen und gegenseitigen Abhängigkeiten sowie der Individualität und Komplexität der Arbeitsabläufe, sind Ausbauprozesse besonders häufig von Störungen betroffen [Köni07, S. 2; Wei12, S. 2]. Aufgrund dieser Abhängigkeiten besteht zudem ein besonders hohes Risiko für das Auftreten von Sekundärstörungen: Tritt beispielsweise bei einem Deckenbauer eine Störung auf, so verursacht dies eine Verzögerung und häufig auch einen Stillstand bei der nachgelagerten Installation von Deckenspots durch einen Elektriker. Werden Bodenarbeiten aufgrund von Störungen nicht fertiggestellt, führt dies mitunter zu einer Sperrung des gesamten Baubereichs und somit zu Verzögerungen aller im selben Baubereich stattfindenden Arbeiten. Eversheim konnte vor diesem Hintergrund für die Einzelfertigung bereits in den 1990er Jahren nachweisen, dass 86% der auftretenden Störungen in der Unikatproduktion vom Ursachenort entfernte Wirkungen hervorgerufen [Ever92, S. 15].

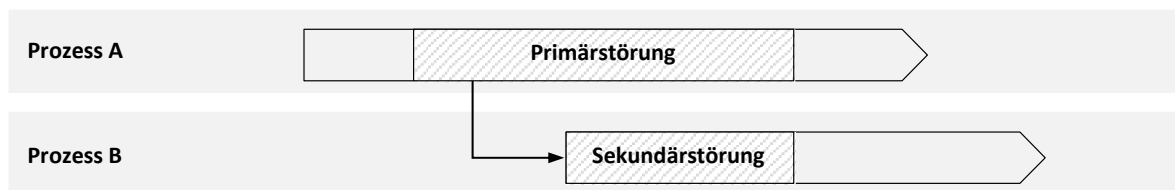


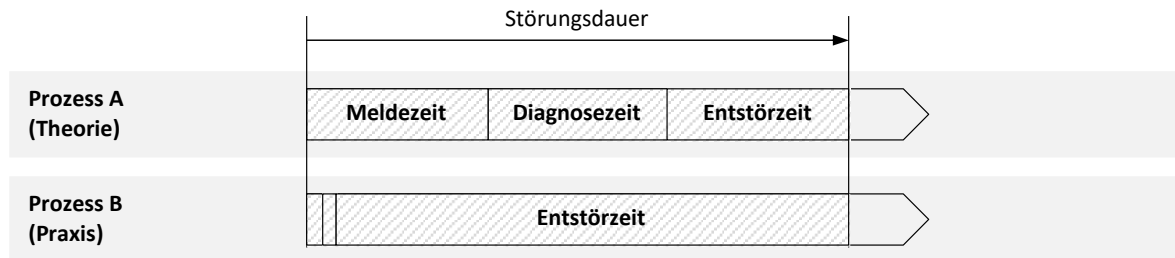
Abbildung 7: Primär- und Sekundärstörungen

14354

Die Klassifizierung als Primär- oder Sekundärstörung ist zudem wichtig, weil sie unterschiedliche Maßnahmen zur Störungseindämmung erfordern können [Schn88, S. 289]. Eine Vertiefung dieser Thematik erfolgt im nachfolgenden Abschnitt sowie an einem konkreten Beispiel in Abschnitt 4.2.1.

### 2.2.2 Störungswirkung

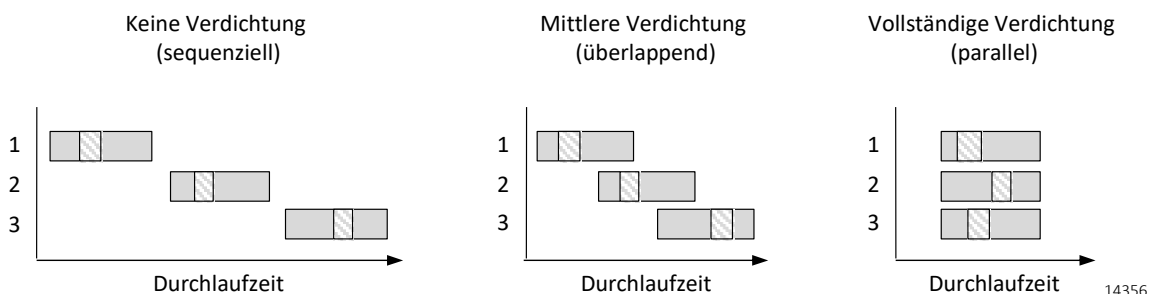
Heil unterteilt den Verlauf einer Störung in eine latente und eine manifeste Phase, wobei erstere vor Beginn der Störungswirkung liegt und in klassischen Produktionssystemen durch entsprechend große Puffer kompensiert werden kann und letztere zu tatsächlichem Stillstand im Produktionsablauf führt [Heil95, S. 72]. Mit Beginn der Störungswirkung teilt sich die Störungsdauer in Melde-, Diagnose- und Entstörzeit auf (vgl. Abbildung 8). In der Praxis manueller Arbeitsprozesse zeigt sich, dass die Zeitanteile für Meldung und Diagnose in der Regel sehr kurz ausfallen: Viele Störungen (z. B. fehlendes Material) sind für den Akteur unmittelbar offensichtlich und bedürfen keinerlei Diagnose. Die Entstörung (Beschaffung des fehlenden Materials) bestimmt somit in erster Linie die Störungsdauer. Während der Störung kommt die wertschöpfende Arbeit zum Erliegen, sodass die Störung unmittelbar produktivitätswirksam ist.



14355

Abbildung 8: Störungsmodellierung

Die Fortpflanzung von Fehlern stellt ein hohes Risiko in abhängigen Produktionsprozessen dar. Bei sequenziell verketteten Prozessen dämpfen entsprechende Puffer zwischen den Teilprozessen zwar die Fortpflanzung, führen jedoch auch zu einer Verdeckung von Störanfälligkeiten [Lödd16, S. 37]. Dies kommt insbesondere dann zum Tragen, wenn abhängige Folgeprozesse auf den Arbeitsergebnissen eines vorangehenden Prozesses aufbauen: Qualitätsprobleme aus dem ersten Prozess fallen erst verzögert im nachgelagerten Prozess auf [Lödd16, S 38]. Die Folgen sind umfangreiche Nacharbeiten und damit verbundene Sekundärstörungen in gleich mehreren Arbeitsprozessen und ein Anstieg der Durchlaufzeit. Das Problem verstärkt sich, wenn vorliegende Störungen nur unzureichend zwischen Teilprozessen kommuniziert werden oder sich die Teilprozesse der gegenseitigen Abhängigkeiten gar nicht bewusst sind. Betrachtet man angelehnt an Abbildung 6 die Verdichtung von Teilprozessen vor dem Hintergrund gestörter Prozesse, so offenbart sich jedoch ein Lösungsansatz: Gelingt eine vollständige Verdichtung (Parallelisierung) der Teilprozesse, so wären Verursacher und alle Leidtragenden zur gleichen Zeit vor Ort. Störungen könnten schnell und in direkter Absprache zwischen den Gewerken behoben werden. Störungen, die erst verspätet in nachgelagerten Prozessen bemerkt werden und zu einem Problem werden profitieren in besonderem Maße, da sie schnell auffallen und mit wenig Aufwand korrigiert werden können. Zwar ist in jedem Fall auch mit negativen Einflüssen auf die Durchlaufzeit zu rechnen, jedoch sind diese absehbarer und ließen sich wiederum durch einen entsprechenden Puffer am Ende des Prozessblocks kompensieren. Die vollständige Verdichtung würde jedoch auch dazu führen, dass sich jede noch so kleine Störung unmittelbar fortpflanzt, da keine dämpfenden Puffer dies verhindern. Wie in Abschnitt 2.1.3 beschrieben, stellt die vollständige Verdichtung nur einen theoretischen Fall dar, der in der Praxis aufgrund begrenzter (häufig örtlicher) Ressourcen nicht realisierbar ist. Eine praktisch umsetzbare, mittlere Verdichtung, bietet sich hingegen als guter Kompromiss an.



14356

Abbildung 9: Störungen in verdichteten Arbeitsprozessen

Aufgrund obiger Ausführungen lässt sich zusammenfassen, dass Störungen weitreichende Verände-

rungen organisatorischer Abläufe verursachen können und im schlimmsten Fall auch Projektdurchlaufzeiten und Liefertermine beeinflussen. Der Umfang möglicher Sekundärstörungen hängt von den Abhängigkeiten zwischen den Prozessen, etwaigen Puffern sowie dem Umgang mit der Primärstörung (und dessen Kommunikation) ab. Eine Verdichtung von Teilprozessen führt dazu, dass Sekundärstörungen schneller bemerkt und im besten Fall direkt von dem ebenfalls vor Ort befindlichen Verursacher mit wenig Aufwand behoben werden können. Nichtsdestotrotz bedarf es eines geeigneten Störungsmanagements. Die Grundlagen dazu werden im folgenden Abschnitt näher beleuchtet.

### 2.2.3 Störungsmanagement

Im Störungsmanagement wird grundlegend zwischen der Vermeidung und der Bewältigung von Störungen unterschieden [Fisc07, S. 31]. Eine Störungsvermeidung kann in der Unikatproduktion mithilfe unterschiedlicher Methoden bewirkt werden. Die Bewältigung einer Störung bzw. der daraus resultierenden Sekundärstörungen erfordert eine differenzierte Auseinandersetzung mit den vorliegenden Abhängigkeiten der Arbeitsprozesse.

#### Vermeidung von Störungen

In Anlehnung an die in Abschnitt 2.2.1 identifizierten Ursachen für Störungen in der Unikatproduktion ergeben sich drei zentrale Ansätze zur Vermeidung:

1. **Bereitstellen aller notwendigen Informationen für die Arbeitsaufgabe:** Das Einholen von fehlenden Informationen führt zu Unterbrechungen und gänzlich fehlende Informationen im ungünstigsten Fall zu Qualitätsproblemen. Gelänge es, sämtliche Informationen direkt bereitzustellen, würden diese Störungen vollständig entfallen.
2. **Bereitstellen sämtlicher Materialien und Hilfsmittel:** Zwar ist die Bereitstellung von Materialien und Hilfsmitteln häufig Aufgabe der Werker selbst, jedoch ist der Bedarf zu Beginn einer Arbeitsaufgabe häufig unklar und ergibt sich erst während der Durchführung der Tätigkeit. Die damit verbundenen Unterbrechungen ließen sich vermeiden, wenn die Materialien oder zumindest die Informationen über den genauen Materialbedarf schon vor Beginn der Arbeitsaufgabe verfügbar wären.
3. **Unterstützen einer raschen Bauteil- und Bauplatz Vorbereitung:** Das Vorbereiten von Bauteilen und das Einrichten des Bauplatzes nehmen häufig viel Zeit in Anspruch. Ursächlich ist in vielen Fällen eine unzureichende Planung, die dazu führt, dass Arbeitsaufgaben aufgrund fehlender Materialien oder des Schichtwechsels unterbrochen und die vorbereitenden Tätigkeiten wiederholt durchgeführt werden müssen.

#### Bewältigung von Störungen

Gelingt es mit den aufgeführten Methoden nicht, die Störung zu vermeiden, so ergeben sich unmittelbar die Aufgaben, ihre Fortpflanzung zu verhindern und eine schnelle Entstörung herbeizuführen. Für die Bewältigung von Störungen bestehen wiederum unterschiedliche Ansätze. Im Folgenden werden die für die Unikatproduktion relevanten Ansätze diskutiert.

1. **Einplanen von Puffern:** Ziel von Puffern ist es, die Fortpflanzung von Störungen zu verhindern

oder zumindest zu reduzieren. Es wird zwischen zeitlichen und kapazitiven Puffern sowie Bestandspuffern unterschieden [Spea14, S. 2]. In der Regel werden bei manuellen Ausrüstungsprozessen in der Unikatproduktion zeitliche Puffer eingesetzt, um abhängige Teilprozesse zu entkoppeln. Kommt es dennoch zu Problemen, besteht zusätzlich die Möglichkeit, die Kapazität in einzelnen Teilprozessen zu erhöhen, z. B. durch Überstunden oder durch Personaldienstleister, wobei dies in der Regel mit entsprechenden Vorlaufzeiten verbunden ist. Hohe Unsicherheiten in der Planung führen zudem dazu, dass die eingeplanten Puffer (die meist mit einer Standardlänge geplant werden) häufig nicht ausreichen und Störungen sich trotz der Puffer schnell auf weitere abhängige Teilprozesse ausbreiten. Führen prozessbedingte Abhängigkeiten dazu, dass qualitätswirksame Fehler erst in nachfolgenden Teilprozessen erkannt werden, sind die Puffer in Bezug auf die Fehlerfortpflanzung jedoch wirkungslos.

2. **Verringern von Schnittstellen und Abhängigkeiten:** Schnittstellen und Abhängigkeiten zwischen einzelnen Arbeitsprozessen führen dazu, dass sich selbst kleine Störungen im Prozessablauf auf nachfolgende Prozesse auswirken. Es kommt zu kosten-, termin- oder gar qualitätswirksamen Folgestörungen. Der Umfang von Schnittstellen und Abhängigkeiten hängt maßgeblich von der Anzahl der Prozessbeteiligten ab. Wie in Abschnitt 2.1.2 erläutert, erfordert es die Komplexität der Produkte jedoch, verschiedene Fachdisziplinen in Form von Gewerken und externen Fachbetrieben in den Produktionsprozess einzubeziehen. Dieser Stellhebel steht somit nur bedingt zur Verfügung. Vielmehr gilt es, Störungen in geeigneter Weise zu dokumentieren, zu kommunizieren und ihre Entstörung zu koordinieren und so trotz Schnittstellen und Abhängigkeiten ein geeignetes Störungsmanagement zu ermöglichen.
3. **Vollständige Dokumentation von Störungen:** Fehlende Informationen erschweren es, Störungen schnell und mit geringem Aufwand zu beheben [Gron19, S. 34]. In Kombination mit einer unzureichenden Kommunikation ist es zudem kaum möglich, Erfahrungswissen im Umgang mit Störungen gezielt einzusetzen und einen effizienten Lernprozess (Lessons Learned) aufzubauen [Gron19, S. 34]. Es bietet sich daher an, Störungen gemeinsam mit ihren Ursachen, den getroffenen Maßnahmen und ihren Konsequenzen zu dokumentieren, um so auch zukünftig in ähnlichen Situationen sinnvolle Maßnahmen ableiten zu können [Miss18, S. 670] bzw. die Ursachen von vornherein gezielt vermeiden zu können. Aufgrund der Vielzahl beteiligter Gewerke und Mitarbeiter unterschiedlicher Prozesse sowie der hohen Anzahl von Störungen würde dies jedoch ohne geeignete Werkzeuge zu hohen Zusatzaufwänden und zu einer geringen Akzeptanz bei den Akteuren führen.
4. **Schnelle Kommunikation von Störungen:** Wenn die Beteiligten Störungen schnell an die möglichen Problemlöser und an die betroffenen Folgeprozesse kommunizieren, ist es häufig möglich, die Auswirkungen zu verringern und die weitere Fortpflanzung zu vermeiden. Fehlende Informationen, eine unzureichende Kommunikation zwischen den Beteiligten der Prozesskette sowie ungeklärte Verantwortlichkeiten erschweren die Bewältigung der Störung und ihrer Auswirkung [Gron19, S. 35]. Entsprechend bedarf es geeigneter Werkzeuge, um die notwendigen Informationen für die Folgeprozesse und die Problemlöser gezielt bereitzustellen. Dafür sind die störungsrelevanten Informationen zu konsolidieren, den korrekten Adressaten zuzuordnen und die Informationen für diese sinnvoll zu filtern und darzustellen.
5. **Priorisierung und Koordination der Entstörung:** Auch eine vollständige Informationsverfügbarkeit garantiert keine reibungslose Entstörung: Aufgrund der Produktkomplexität sind Entschei-

Träger (in der Regel Bauleiter) häufig nicht in der Lage, alle entscheidungsrelevanten Faktoren zu erfassen und zu verarbeiten [Fisc07, S. 21]. Hinzu kommt, dass die Bauleiter zumeist Verantwortung über weitläufige Baubereiche haben und so zwangsläufig den überwiegenden Teil der Störungen aus der Ferne beurteilen müssen. Wird eine Störung vom Bauleiter falsch eingeschätzt und beispielsweise die Entstörung zu niedrig priorisiert, kann dies mitunter schwerwiegende Folgestörungen bedeuten. Es ist daher erforderlich, die Bauleiter mit sämtlichen Informationen zu versorgen, die für die Priorisierung notwendig sind. Diese sind so aufzubereiten, dass eine Priorisierung schnell und aus der Ferne vorgenommen werden kann. Auch müssen Möglichkeiten bestehen, die Entstörung rasch und ebenfalls möglichst aus der Ferne zu koordinieren.

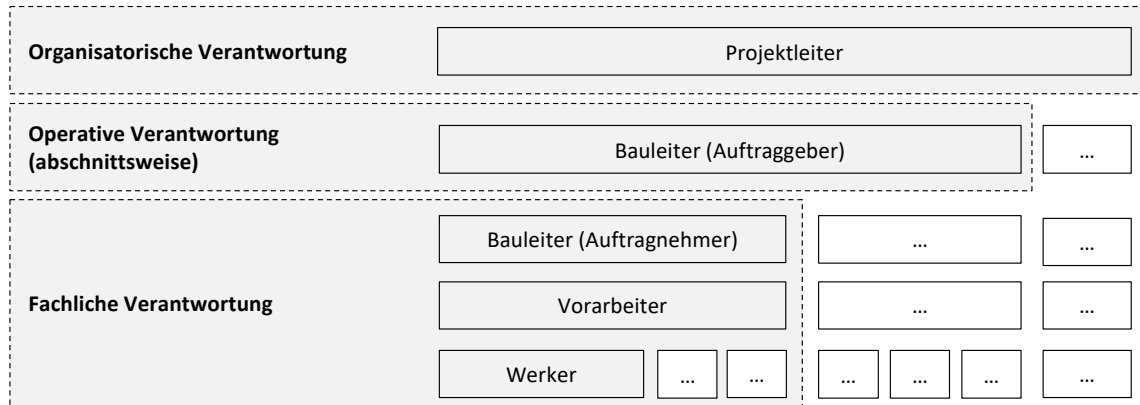
## 2.3 Kollaboratives Arbeiten

Die Akteure (Abschnitt 2.3.1) im Produktionsprozess eines Unikates teilen sich trotz unterschiedlicher Aufgabenbereiche eine Vielzahl von Ressourcen: Sie agieren im selben Bauraum, teilen sich Stellflächen, Werkzeuge, Maschinen oder Teile der Infrastruktur. Es ist daher notwendig, dass die Beteiligten kollaborativ (Abschnitt 2.3.2) handeln, ohne sich gegenseitig zu behindern. Ein gezielter Austausch von Informationen (Abschnitt 2.3.3) im Sinne einer effizienten Kommunikation (Abschnitt 2.3.4) ist daher ein wichtiger Faktor für den reibungslosen Ablauf des Gesamtprozesses. Die Herstellung einer effizienten Kommunikation ist jedoch nicht trivial und an Anforderungen geknüpft (Abschnitt 2.3.5).

### 2.3.1 Akteure

Die komplexe Unikatproduktion ist häufig eine Kombination aus Werkstatt-, Linien- und zentraler sowie dezentraler Baustellenfertigung, wobei insbesondere letztere von manuellen, parallel durchgeführten Arbeitsgängen geprägt wird (vgl. Abschnitt 2.1.2). Zur Koordination der operativen Abläufe bedarf es einer geeigneten Organisation. Die daran beteiligten Akteure und ihr Zusammenwirken sind im weiteren Verlauf dieser Arbeit von zentraler Bedeutung. Je nach Branche und Produktkomplexität unterscheiden sich die Organisationsformen und Bezeichnungen für die Akteure. Abbildung 10 fasst die für diese Arbeit relevanten Rollen, Verantwortlichkeiten und Beziehungen in vereinfachter Form zusammen. Unterhalb der Geschäftsführung stellt der **Projektleiter** die Schnittstelle zum operativen Bereich dar und übernimmt die organisatorische Gesamtverantwortung für ein Bauprojekt.

**Bauleiter** koordinieren, leiten und überwachen die Vorgänge auf der Baustelle, wobei sämtliche Aufgaben eng mit den Abläufen auf der Baustelle zusammenhängen [Duve14, S. 12]. In diesem Kontext gilt ein besonderes Augenmerk des Bauleiters dem sicheren bautechnischen Betrieb auf der Baustelle sowie insbesondere dem gefahrlosen Ineinandergreifen sämtlicher Arbeiten [HBau20, §57]. In der Praxis finden sich häufig mehrere Bauleiter, die hierarchisch organisiert für einzelne, örtlich getrennte Bauabschnitte zuständig sind bzw. sich auf konkrete fachliche Gewerke konzentrieren. Bei einer Fremdvergabe ist zudem zwischen Bauleitern des Auftraggebers und des Auftragnehmers zu unterscheiden. Ersterer überwacht die vertragsgemäße Leistungserbringung des Auftragnehmers und letzterer ist für die eigentliche Leitung der Baustelle zuständig [Duve14, S. 17].



14357

Abbildung 10: Akteure der Baustellenfertigung

Der **Vorarbeiter** hat die Aufgabe, den Einsatz der Werker verantwortlich zu leiten und zu überwachen und ist zugleich Sprecher der Werker und Ansprechpartner für den übergeordneten Bauleiter [DBau22], [REFA22]. Im Gegensatz zum Bauleiter ist der Vorarbeiter in der Regel unmittelbar am Prozess vor Ort beteiligt und kann daher Probleme und Störungen einfacher erkennen [Fabe18, S. 461]. Der Vorarbeiter teilt in der Praxis Arbeitsaufgaben zu, überprüft ihre korrekte Ausführung und ist häufig unmittelbar an der Lösung aufkommender Probleme beteiligt: Er beschafft beispielsweise fehlendes Material und stößt erforderliche Logistikprozesse an [Fabe18, S. 460]. Die Aufteilung hat zum Ziel, die **Werker** als Fachleute und unmittelbar wertschöpfende Mitarbeiter von administrativen Tätigkeiten zu entlasten.

### 2.3.2 Begriffseinordnung: Kollaboration

Bauleiter, Vorarbeiter und Werker unterschiedlicher Unternehmen arbeiten eng zusammen, um sowohl ihre individuellen als auch die übergeordneten Ziele zu erreichen. Aufgrund des hohen Anteils manueller Arbeit ist eine gute Zusammenarbeit Grundvoraussetzung für einen effizienten Produktionsablauf. Der Begriff der Kollaboration ist in der Literatur eingängig beschrieben. Erläuterungen (auch im industriellen Kontext) finden sich beispielsweise in [Tode01], [Gron02, S. 4ff.], [Stol03, S. 40ff.], [Hilb14, S. 146] oder [Bors15, S. 168]. Eine Grundvoraussetzung für Kollaboration ist Kommunikation, also der Austausch von Informationen in Form von Sprache, Daten oder auch Bildern [Gron02, S.4]. Um Redundanzen und zusammenhanglose Ergebnisse zu vermeiden, sind zusätzlich geeignete Koordinationsprozesse erforderlich [Hilb14, S. 146]. Betrachtet man die im vorigen Abschnitt vorgestellte Organisationsstruktur in der Unikatproduktion wird klar, dass Werker sowohl vertikal mit Bauleitern als auch horizontal mit Kollegen kommunizieren. Die vertikale Kommunikation wird hierbei zumeist durch die hierarchische Ordnung bedingt (z. B. sind Bauteilbeschädigungen zu melden, damit diese vom Lieferanten ersetzt werden können). Die horizontale Kommunikation erfolgt zumeist als informelle Abstimmung, bei der beispielsweise der Rat eines Kollegen zu einer schwierigen Montageaufgabe eingeholt wird. Auch die Koordination lässt sich in vertikale und horizontale Vorgänge untergliedern: Bauleiter nehmen erledigte Arbeitsaufgaben ab und teilen neue zu und sorgen so für einen qualitätsgerechten und effizienten Gesamtablauf der Produktion. Zwischen Kollegen spricht man sich ab, um die Arbeit für jeden möglichst effizient zu gestalten: Es werden einander Werkzeuge und Materialien aus den Ausgabestellen und Lägern mitgebracht oder bei körperlich anstrengenden Tätigkeiten einander geholfen.

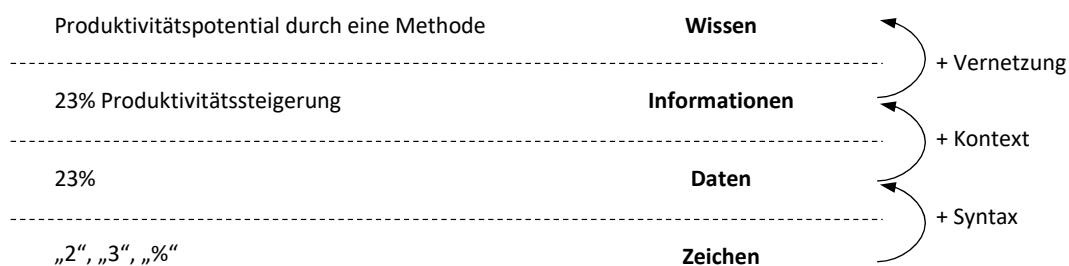
Kooperation wird zum Teil strikt von Kollaboration abgegrenzt (z. B. in [Stol03, S. 40ff.] bzw. [Tode01]). Nach diesem Verständnis verfolgen die einzelnen Parteien zwar ein gemeinsames Ziel, erledigen die dafür notwendigen Teilaufgaben aber vollständig unabhängig voneinander: Person A verspachtelt die Wand, Person B bringt später die Farbe auf. Kollaboration hebt die strikte Trennung von Teilaufgaben auf: Jeder tut alles und alle tun das gleiche [Tode01]: Die zwei Personen verspachteln gemeinsam die Wand und bringen danach gemeinsam die Farbe auf.

In den Prozessen der Unikatproduktion kann nur schwer zwischen den beiden Zusammenarbeitsformen unterschieden werden, da beide Fälle häufig und abwechselnd auftreten. Es ist zwar grundsätzlich möglich, dass Gewerke unabhängig voneinander arbeiten, in der Praxis bildet sich aber stets eine sehr enge Zusammenarbeit aus, bei der (soweit möglich) versucht wird, gemeinsam die Produktionsaufgabe zu erfüllen. Kollaboration wird daher im weiteren Verlauf dieser Arbeit als Oberbegriff für das arbeitsteilige Erledigen von Aufgaben verwendet und somit als Gegenpol zum alleinigen Arbeiten angesehen. An dieser Stelle unterscheidet sich auch der Grundansatz der zu entwickelnden Assistenzsysteme für Werker und Bauleiter vom Stand der Technik (eine detaillierte Auseinandersetzung erfolgt in Abschnitt 2.4): Heutige Systeme konzentrieren sich auf die Unterstützung einzelner Arbeitsprozesse und lassen damit die Herausforderungen und Potenziale der kollaborativen Prozesse außer Acht.

In der Praxis erschweren die gegenwärtigen Organisationsstrukturen, unübersichtliche Baustellen und ungeeignete Prozesse für die Kommunikation mit Vorgesetzten (vertikal) und mit Kollegen (horizontal) die Kollaboration. Die Kommunikation ist besonders schwierig, wenn sie sich über verschiedene Schichten, Gewerke oder Unternehmen erstrecken muss. Es bedarf daher geeigneter Werkzeuge, die eine Kommunikation und Koordination in diesem Umfeld ermöglichen bzw. unterstützen und so zu einer effizienten Kollaboration beitragen.

### 2.3.3 Begriffseinordnung: Information

Im Allgemeinen stehen Wissen, Informationen, Daten und Zeichen in einem abstrakten Zusammenhang (vgl. Abbildung 11). Demnach werden **Informationen** als kontextbezogene Daten verstanden, wodurch die zusammenhanglosen Zeichenfolgen erst eine Bedeutung erlangen. Vernetzte Informationen werden weiterhin als Wissen bezeichnet.



14358

Abbildung 11: Abgrenzung von Zeichen, Daten, Informationen und Wissen, in Anlehnung an [Rehä96, S. 5], [Nort11, S. 40], [Krcm15, S. 12], [Leim15, S. 25],

Für den Begriff der Information existieren darüber hinaus zahlreiche Definitionen. Die für diese Ausarbeitung relevanten Aspekte wurden von Krcmar und Hübner treffend zusammengefasst: Informationen sind zweckorientiertes Wissen, das dazu dient, Entscheidungen oder Handeln vorzubereiten

[Krcm15, S. 15]. Eine Information kann in diesem Zusammenhang als auslösendes sowie unterstützendes Element von Tätigkeiten verstanden werden [Krcm15, S. 15], [Hüb96, S. 3]. In Anlehnung an [Wang96, S. 20] zeichnet sich eine qualitativ hochwertige Information durch die folgenden Merkmale aus:

- **vollständig** → vermeidet ungeplante Informationsbeschaffung
- **wahr** → vermeidet Qualitätsprobleme, Nacharbeit und Kosten
- **relevant** → vermeidet Überinformation und somit Suchaufwände
- **verständlich** → vermeidet Fehlinterpretationen (Qualitätsprobleme, Nacharbeit, Kosten)
- **verfügbar** → vermeidet Beschaffungsaufwand

Um für einen Arbeitsprozess Informationen in hoher Qualität zur Verfügung zu stellen, bedarf es demnach neben geeigneten, vertrauenswürdigen Quellen auch entsprechender Mechanismen und Werkzeuge, um aus der Menge verfügbarer Informationen diejenigen vollständig herauszusuchen zu können, die für den konkreten Prozess relevant sind, diese verständlich aufzubereiten und zur Verfügung zu stellen.

### 2.3.4 Effiziente Kommunikation

Der regelmäßige persönliche Austausch zwischen Prozessbeteiligten ist der klassische Weg, um kollaborative Prozesse zu unterstützen. Groß zeigt für die dezentrale Organisation der Planung und Steuerung zwei grundsätzliche Möglichkeiten auf Störungen zu kompensieren: Organisation mit vertikaler oder horizontaler Kommunikation. Der vertikale Ansatz sieht vor, Störungen zunächst bereichs- oder teamintern auszugleichen und bei Gefährdung des bereichsübergreifenden Grobterminplans an die zentrale Planungsstelle zu melden. Der horizontale Ansatz sieht vor, Störungen autonom in direkter Kommunikation mit den beteiligten Bereichen auszugleichen und bei Gefährdung des Grobplans externe Partner in Form einer Fremdvergabe einzubeziehen [Groß10, S. 135ff.]. Sowohl horizontale als auch vertikale Kommunikation ist jedoch nur dann zielführend, wenn diese möglichst ungestört vonstattengeht.

#### Das Sender-Empfänger-Modell der Kommunikation

Die Kommunikation zwischen Sender und Empfänger wird in hohem Maße von Annahmen und dem gegenwärtigen Kontext, in dem sich die Kommunikationspartner befinden, beeinflusst. Derselben Information können durch die Erwartungen des Einzelnen unterschiedliche Bedeutungen zugesprochen werden [Scha12, S. 145]. Abbildung 12 verdeutlicht diesen Sachverhalt: Die Intention des Senders wird von ihm kodiert, die Information übermittelt und empfängerseitig dekodiert, wobei eine subjektive Wahrnehmung der ursprünglichen Intention hervorgerufen wird.

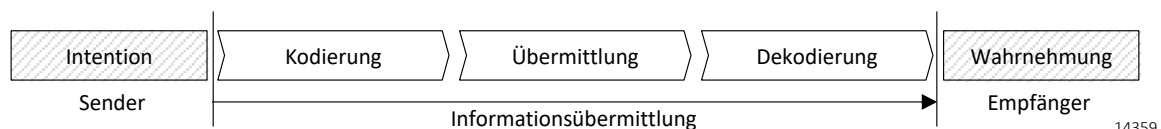


Abbildung 12: Das Sender-Empfänger-Modell der Kommunikation, in Anlehnung an [Ulri02, S. 56ff.], [Scha12, S. 147]

Grundsätzlich können bei der Informationsübermittlung verschiedenste Störungen auftreten: Es wird nicht das gesagt, was gemeint ist (Kodierungsproblem), das Senden, Übertragen oder Empfangen der Information ist technisch gestört (Übermittlungsproblem) oder die Information wird anders wahrgenommen, als sie übermittelt wurde (Dekodierungsproblem) [Scha12, S. 151ff.].

In der industriellen Praxis existieren zahlreiche Beispiele für die beschriebenen Probleme: Ein Werker meldet seinem Vorarbeiter eine Beschädigung an einem Bauteil, kennt aber die konkrete Sachnummern nicht, um seine Beschreibung zu konkretisieren (Kodierungsproblem). Der Vorarbeiter kann den Bauleiter nicht erreichen, da sich dieser im Maschinenraum befindet und keine Funkverbindung hat (Übermittlungsproblem). Nachdem der Bauleiter kontaktiert werden konnte, kann er die Schwere der Beschädigung durch die Beschreibung des Vorarbeiters nicht einschätzen (Dekodierungsproblem) und schließlich keine Aussage zum weiteren Verfahren machen.

Die Probleme können verringert werden, wenn die an der Kommunikation beteiligten Personen ein gemeinsames Verständnis der gegenwärtigen Situation entwickeln. Dies ist nach Schaub eine Voraussetzung für das Gelingen kooperativen Handelns [Scha12, S. 149]. Hierzu bedarf es geeigneter Werkzeuge, um allen Kommunikationspartnern ein umfangreiches, aber vor allem einheitliches Bild der gestörten Situation zu vermitteln. Weiter bedarf es entsprechender Konzepte, die störungsrelevanten Informationen unmissverständlich und auf Seite des Senders möglichst standardisiert zu erzeugen, sodass sie der Empfänger unmissverständlich aufnehmen kann.

### **Schneller Informationsaustausch**

Im Schiffbau sind wöchentliche Abstimmungsrunden die Regel, um Störungen im Ausbaubetrieb zu melden und zu diskutieren [Rose17, S. 3]. Das bedeutet, dass die Kommunikation einer möglicherweise schwerwiegenden Störung im ungünstigsten Fall erst nach sieben Tagen erfolgt. Aufgrund der Vielfalt beteiligter Gewerke und Unternehmen und der für den einzelnen häufig unübersichtlichen Situation ist ein direktes Gespräch außerhalb der besagten Wochenrunden nicht immer möglich, da dem Verursacher die Tragweite und die damit verbundenen Adressaten möglicher Folgestörungen nicht bekannt sind. Eine kommunikationsfähige Organisationsstruktur ist ein zentraler Bestandteil, um den Fluss von Informationen zu beschleunigen, Entscheidungsfindungen zu fördern und Missverständnisse zu verhindern [Gruß10, S. 89].

Petermann wendet Methoden der Regelungstechnik auf die Produktion an [Pete96, S. 35ff.]. Sieht man die Produktion als Teil eines Regelkreises (vgl. Abbildung 13), in dem durch eine Messeinrichtung Soll- und Ist-Werte einer Zielgröße (z. B. der Durchlaufzeit) abgeglichen werden, so lassen sich unerwünschte Abweichungen der Zielgröße durch unterschiedliche Regler-Ansätze verringern [Pete96, S. 35]. Störungen wirken im Sinne einer Systemlast auf die Produktionsabläufe ein und führen zu Abweichungen der Ist- und Soll-Werte [Klett14, S. 11ff.]. Die Betrachtungsweise erlaubt es, Ansätze und Erkenntnisse aus der Regelungstechnik bei der Systematisierung des Produktionsprozesses heranzuziehen: Das Nyquist-Shannon-Theorem [Shan49] besagt, dass die Abtastfrequenz des Reglers (respektive die Häufigkeit, in der die Messeinrichtung die Status der Produktion abgleicht und bewertet) mindestens doppelt so hoch sein sollte wie die Frequenz, mit der Störungen auftreten [Klett14, S. 26].

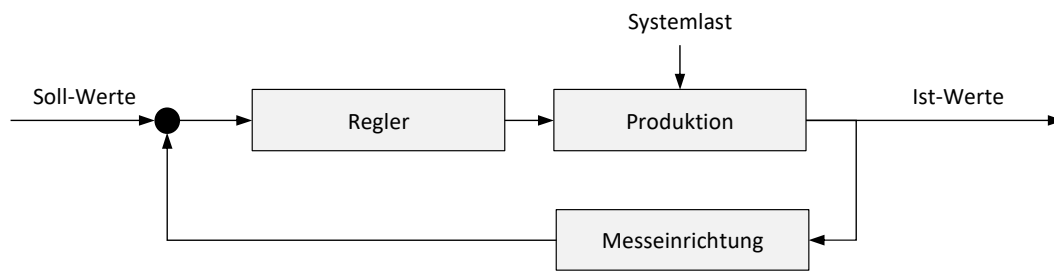


Abbildung 13: Produktionsregelung, nach [Pete96, S. 35]

14360

Die Adaption aus der Regelungstechnik zeigt den hohen Stellenwert, schnell auf Störungen zu reagieren, um mit entsprechenden Maßnahmen in der Produktions-Regelung (z. B. Anpassung der Kapazität) die Folgen zu begrenzen. Auch gilt die Informationsgenauigkeit neben der Reaktionsgeschwindigkeit als zentraler Stellhebel, die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems zu steigern [Klett14, S. 27], da im Sinne der Störungsbewältigung ansonsten keine zielführende Regelung stattfinden kann. In intransparenten Prozessen, wie sie in der Unikatproduktion vorliegen, sind die zur Regelung notwendigen Kennzahlen (z. B. produzierte Menge, Maschinenzustände, aktuelle Leistung, aktuelle Auftragsbestände, Qualität und Kosten [Klett14, S. 27]) häufig unscharf [Gruß10, S. 62]. Insbesondere das Rückmelden von Produktionsfortschritten ist als mangelhaft anzusehen [Wand14, S. 24]. Es werden daher alternative bzw. ergänzende Methoden benötigt, um Informationen im Regelkreis der Produktion schnell und genau übertragen zu können. Digitale Assistenzsysteme versprechen hier Abhilfe, da sie mit geeigneten Werkzeugen viele Informationen (teils automatisch) mit geringem Aufwand erfassen und schnell mit den Empfängern teilen können.

### Synchrone und asynchrone Kommunikation

Grundsätzlich muss die Kommunikation in kollaborativen Arbeitsprozessen nicht zwangsläufig zur selben Zeit am selben Ort stattfinden. Es wird zwischen synchroner und asynchroner Kommunikation unterschieden [BBGM21, S. 5]: Persönliche Gespräche, Meetings und (Video-) Telefonate sind klassische Beispiele synchroner Kommunikation. Sie setzen voraus, dass alle Kommunikationsteilnehmer zeitgleich kommunikationsbereit sind [BBGM21, S. 5]. E-Mails, Wikis o. Ä. sind dagegen klassische Medien der asynchronen Kommunikation. Dialoge in asynchroner Form bieten den Vorteil einer langfristigen Dokumentation, nehmen aufgrund dessen jedoch auch mehr Zeit in Anspruch. Moderne Kommunikationswerkzeuge wie Microsoft Teams ermöglichen es, asynchrone und synchrone Kommunikation zu kombinieren: So können beispielsweise mehrere Teilnehmer zeitgleich (synchron) Nachrichten in einem Chat veröffentlichen. Diese werden jedoch ebenfalls gespeichert und können so bei Bedarf zu einem späteren Zeitpunkt (asynchron) nachvollzogen oder ergänzt werden.

### 2.3.5 Anforderungen effizienter Kommunikation

In den vorangegangenen Abschnitten wurden mehrere Kriterien für eine effiziente Kommunikation herausgearbeitet: Die Kommunikation muss ungestört und schnell erfolgen, hierbei jedoch auch die klassischen Vorteile (Transparenz, Dokumentation) asynchroner Kommunikationswerkzeuge umsetzen. Ziel ist es, Mitarbeitern Zugang zu jeder Information zu geben, die sie für ihre Arbeit brauchen. Da insbesondere Informationen zu Störungen zu Produktionsbeginn nicht vorliegen, ist dies eine

große Herausforderung. Zudem wird die Menge der Informationen in großen Projekten schnell unübersichtlich, so dass die Mitarbeiter Informationszugänge benötigen, um genau die Informationen abrufen zu können, die für die jeweilige Arbeitssituation relevant sind. Es bietet sich eine offene Informations-Struktur als Basis an, bei der jeder Akteur Informationen speichern und entnehmen kann [Supp18].

Die Parallelisierung von Aufgaben ist ein wesentliches Werkzeug, um die Durchlaufzeit zu reduzieren (vgl. Abschnitt 2.1.3). Sie kann zudem dazu beitragen, die Störungsbewältigung zu vereinfachen (vgl. Abschnitt 2.2.2). Dies setzt jedoch voraus, dass zwischen den einzelnen Prozessen eine aktive und effiziente Kommunikation stattfindet. Hierzu bedarf es entsprechender Unterstützungssysteme, die eine schnelle und detaillierte Überwachung und Synchronisation der Produktionsarbeiten ermöglichen.

Im Kontext computergestützter kooperativer Arbeit (CSCW: Computer Supported Cooperative Work) werden nach der zeitlichen und örtlichen Trennung häufig vier Quadranten unterschieden. Für den weiteren Verlauf dieser Arbeit sind grundsätzlich Werkzeuge für alle vier Bereiche relevant: Entstörvorgänge (vgl. Abschnitt 2.2.3) erfordern eine zeitgleiche, bilaterale Abstimmung von entfernten Entscheidern (in der Regel Bauleiter) mit den Werkern vor Ort. Bauleiter, die Kolonnen von Workern koordinieren, tun dies zumeist ebenfalls aus der Ferne und betrachten Zeiträume, die sich über mehrere Tage erstrecken. Kommunikation am selben Ort stellt in der Regel keine besondere Herausforderung dar, jedoch bedarf es auch in diesem Fall einer geeigneten Strategie zur Dokumentation von Entscheidungen bzw. Störungen und ergriffenen Maßnahmen. In der Unikatproduktion werden häufig Arbeiten von einem Gewerk begonnen und am selben Ort, jedoch zu einem späteren Zeitpunkt von einem anderen Gewerk fortgeführt. Zur Unterstützung bedarf es eines geeigneten Werkzeugs, das zur Aufnahme konkreter, ortsbezogener Informationen (z. B. über den Arbeitsfortschritt oder aufgetretene Probleme) dient und diese für nachfolgende Akteure sinnvoll aufbereitet und zur Verfügung stellt.

Die Kontrolle von Prozessen sowie ihre Echtzeitfähigkeit gehören aus Sicht der Praxis zu den wesentlichen Potenzialen digitaler Assistenzsysteme [Klap19, S.11]. Die Fähigkeit, Probleme zu lösen, gilt nach einer Studie von Apt als wichtigste kognitive Kompetenz, dessen Bedeutung in Zukunft noch zunimmt, die jedoch zugleich in besonderem Maße von digitalen Assistenzsystemen profitieren könnte [Apt18, S. 6]. Aufgrund der Dominanz direkter Bereiche im Wertschöpfungsprozess der Unikatproduktion sind insbesondere Assistenzsysteme für Werker von hoher Bedeutung. Friedewald et al. konnten nachweisen, dass derartige Assistenzsysteme einen positiven Effekt auf die Arbeitsproduktivität bei der Produktion komplexer Produkte haben [Frie16, S. 152].

## 2.4 Digitale Assistenzsysteme

Digitale Assistenzsysteme dienen in erster Linie der Bereitstellung von Informationen. In Abschnitt 2.3.3 wurde die Bedeutung von Informationen als Produktionsfaktor im betrieblichen Leistungserstellungsprozess [Krcm15, S. 15] dargelegt. Vor dem Hintergrund manueller Arbeitsprozesse der Unikatproduktion lässt sich zwischen zwei Arten von Informationen unterscheiden:

1. Informationen für den Werker, die bereits zu Beginn eines Arbeitsgangs vorliegen: Zeichnungen, Stücklisten, Arbeitsanweisungen, etc.
2. Informationen, die erst während eines Arbeitsgangs entstehen und zwischen Akteuren ausgetauscht werden: Störungen, Änderungen, Fragen, etc.

Der Fokus von Werkerassistenzsystemen liegt bislang auf der unidirektionalen Versorgung eines Arbeitsprozesses mit Informationen und Funktionen (Abschnitt 2.4.1), wie nachfolgend gezeigt werden soll. Zwar sind Kanäle für Rückmeldedaten im Sinne eines Kommunikationswerkzeugs grundsätzlich denkbar und teilweise sogar vorgesehen, spezifische Funktionen zur Interaktion mit übergeordneten oder parallelen Arbeitsprozessen finden sich jedoch vor allem in speziellen, digitalen Kollaborationswerkzeugen (Abschnitt 2.4.2). Diese zumeist für Mitarbeiter indirekter Bereiche konzipierten Werkzeuge sind vielschichtig und ermöglichen eine allgemeine oder auch problembezogene Kommunikation.

### 2.4.1 Werker-Assistenzsysteme

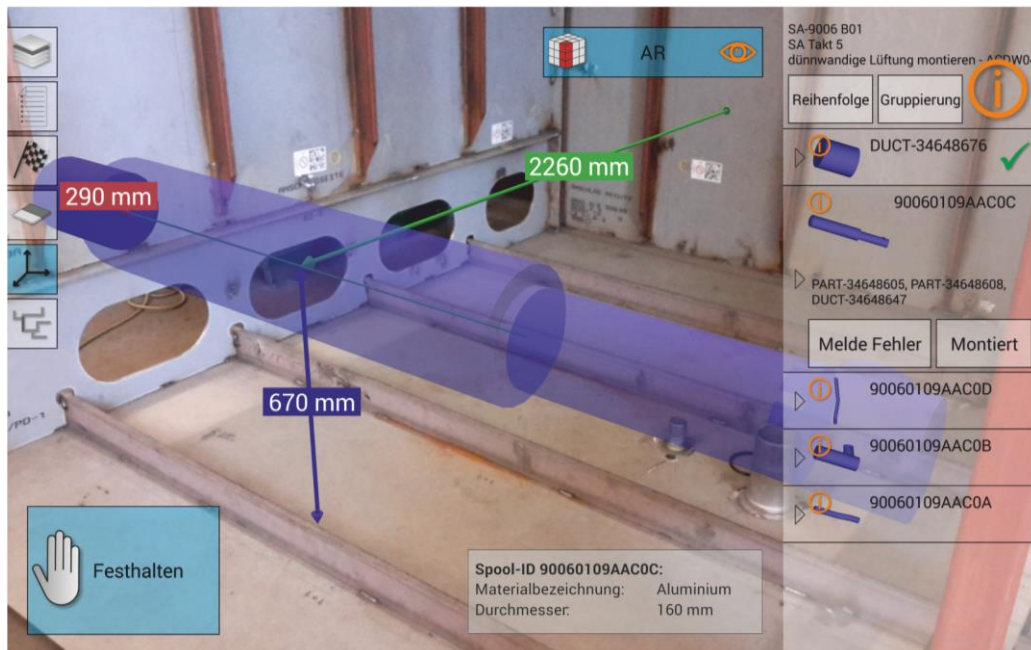
Fertigungsinformationen in Papierform bereitzustellen war lange Stand der Technik [West13, S. 134]. Mit der fortschreitenden Digitalisierung nimmt auch der Einsatz digitaler Dokumente zu, auf die Mitarbeiter z. B. mit dem Smartphone zugreifen können [Hala18, S. 5]. Auch werden Ansichten digitaler 3D-Modelle des Produkts ausgedruckt und in Papierform bereitgestellt. Insbesondere in der Unikatproduktion gestaltet sich diese Form der Bereitstellung jedoch als problematisch [Hala18, S. 6ff]: Der Informationsbedarf ist im Voraus nur teilweise bekannt und ergibt sich häufig erst in der konkreten Montagesituation. Kurzfristige Änderungen führen dazu, dass Fertigungsinformationen während des Prozesses ihre Gültigkeit verlieren. Die Darstellung komplexer (häufig dreidimensionaler) Sachverhalte auf Papier ist aufwändig in der Erstellung. Die problemangepasste Bereitstellung der Fertigungsinformationen auf digitalem Weg löst diese Probleme jedoch größtenteils: Informationen können stets aktuell über die Server des Unternehmens bezogen werden und müssen nur in Einzelfällen durch manuelle Zuarbeit gefiltert bzw. für konkrete Nutzergruppen konfiguriert und freigegeben werden.

#### **Augmented-Reality gestützte Informationsbereitstellung für die Unikatproduktion**

Halata konnte nachweisen, dass ein mobiles Assistenzsystem, das Werkern Informationen intuitiv und bei Bedarf per Augmented Reality (AR) anzeigt, die Produktivität bei der Informationsversorgung bei komplexen Aufbauten der Unikatproduktion um bis zu 30 Prozent steigert [Hala18, S. 145]. Zusätzlich konnte eine deutliche Reduktion der Fehlerquote sowie eine gesteigerte Zufriedenheit der Nutzer nachgewiesen werden [Hala18, S. 145].

Die Anwendung (vgl. Abbildung 14) führt den Anwender durch den Ausbauprozess und stellt die Arbeitsreihenfolge der zu verbauende Bauteile übersichtlich dar (rechts). Die Reihenfolge kann hierbei auf Basis geometrischer Bedingungen (z. B. von links nach rechts) sortiert werden. Das nächste zu verbauende Bauteil wird zudem im 3D-Bereich der Anwendung dargestellt und mit automatisch berechneten Maßen zu Referenzflächen versehen. Der Anwender erhält zusätzlich die Möglichkeit, eine automatisch berechnete Detailansicht einzusehen.

Durch die intuitive, auf das aktuelle Bauteil beschränkte Darstellungsweise, die automatisch berechneten Maße und die Anzeige der Sollposition entfallen Suchaufwände in Zeichnungen. Es werden Rückfragen aufgrund fehlender Maße vermieden, da diese ad-hoc anhand des 3D-Modells ermittelt werden können (bzw. systemseitig ermittelt werden). Dem Produktivitätsgewinn steht nach Halata kein nennenswerter Zusatzaufwand in indirekten Bereichen entgegen [Hala18, S. 144].



14361

Abbildung 14: Benutzeroberfläche der Digitalen Arbeitsunterlage, nach [Hala18, S. 83]

Die Software TIO2DO der Firma attenio GmbH stellt die Weiterentwicklung des beschriebenen Konzepts in Form eines am Markt verfügbaren Produkts dar. Auf funktionaler Ebene zeichnet sich TIO2DO durch die Bereitstellung von montagerelevanten Bauteilattributen sowie erweiterte Funktionen zur Dokumentation aus. Der Anwender kann bauteilbezogen ein Fehlerprotokoll erzeugen, mit Fotos, Videos oder Notizen anreichern und dieses an den indirekten Bereich übermitteln [Atte21].

Der Fokus des Systems liegt auf der proaktiven Unterstützung konkreter Montageprozesse. Halata sieht insbesondere das Rückmelden von Bauteilzuständen (in Bearbeitung, bearbeitet oder fehlerhaft [Hala18, S. 124]) vor und schlägt ebenso wie Hirsch die Verwaltung eines zentral gespeicherten Kerns von global benötigten Produktdaten vor, an welchen einzelne Produktionsabteilungen mit den jeweils eingesetzten, dezentralen Systemen angeschlossen sind [Hala18, S. 110], [Hirs92, S. 63]. Die Weiterverarbeitung dieser Informationen in parallelen Arbeits- oder übergeordneten Planungsprozessen liegen jedoch außerhalb seines Betrachtungsbereichs.

### Assistenzsysteme für die (Klein-) Serienproduktion

Neben den speziell für die Unikatproduktion bzw. den Baustelleneinsatz konzipierten Assistenzsystemen existiert eine Vielzahl weiterer Systeme zur Anzeige montagerelevanter Informationen. TULIP ist ein vom Werkzeugmaschinenhersteller DMG MORI entwickeltes, stationäres Assistenzsystem, das individuell für die Montagelinie erstellte Arbeitsanweisungen in intuitiver Weise darstellen kann

[DMGM21]. RE'FLEKT One [Refl21] und WorkLink [Scop21] stellen ebenfalls spezifische Arbeitsanweisungen dar, zeichnen sich jedoch durch Mobilität und den Einsatz von Augmented Reality zur intuitiveren Darstellung aus. Die Systeme ermöglichen es, detaillierte Montageanleitungen zu erstellen und zu visualisieren und eignen sich daher besonders für die (Klein-) Serienproduktion. In der Unikatproduktion würden sowohl die Erstellung als auch eventuelle Laufwege zu stationären Systemen einen hohen Aufwand bedeuten, den es durch die Vorteile der Systeme zu rechtfertigen gilt.

### 2.4.2 Digitale Kollaborationswerkzeuge

Durch die Corona-Pandemie im Jahr 2020 haben digitale Kollaborationswerkzeuge einen sehr hohen Stellenwert in sämtlichen Unternehmensbereichen erlangt. Unter anderem durch die rasche Entwicklung des Infektionsgeschehens lag der Fokus auf einfachen, schnell zu installierenden und schnell zu erlernenden Systemen.

#### Einfache Kollaborationswerkzeuge

Beispielhaft zu nennen sind WhatsApp, Microsoft Teams, Slack und Mattermost. Alle vier Werkzeuge konzentrieren sich auf den bi- und multilateralen Austausch von Textnachrichten, Fotos, Dokumenten und Videos und unterstützen zudem in unterschiedlichen Weisen Video- und Telefonkonferenzen. Die Systeme zeichnen sich durch einen geringen Einrichtungs- und Pflegeaufwand aus. Die Ursache ist vornehmlich in der geringen bzw. nicht vorhandenen Verankerung in der Unternehmens-IT zu suchen. Im Umkehrschluss bedeutet dies aber auch, dass Geschäftsobjekte wie Bauteilreferenzen, Meldungen oder gar CAD-Modelle nicht unmittelbar Bestandteil des Informationsaustausches sein können.

Remote Maintenance bezeichnet die Unterstützung eines Servicetechnikers durch einen entfernten Experten. Die Parametric Technology GmbH (PTC) bietet mit Vuforia Chalk eine Augmented-Reality-fähige Anwendung, bei der ein Experte das Kamerabild des Technikers sehen und live mit Annotationen versehen kann. Diese werden auf dem AR-Endgerät an die physischen 3D-Objekte der realen Welt geheftet [PTC21]. Oculavis Share der Oculavis GmbH bietet, neben einer ähnlichen Funktionalität für mehrere Benutzer, Funktionen zur Erkennung von Maschinen und Anlagen mittels QR-Codes sowie Mechanismen zur Speicherung von fallbasiertem Wissen in einer Datenbank [Ocul21].

#### 2D-Planungs- und Steuerungswerkzeuge

2D-Pläne sind insbesondere in der weitläufigen Baustellenproduktion nach wie vor Stand der Technik. Sie enthalten Arbeitsanweisungen in Form von Zeichnungen, Maßangaben und textuellen Zusatzinformationen. Zwar stellen insbesondere Papierpläne ein praktisches, portables und jederzeit einsatzbereites Medium dar, in kollaborativen Arbeitsprozessen, bei denen Entscheidungen schnell abgestimmt getroffen und kommuniziert werden müssen, kann der papierbasierte Informationsaustausch jedoch zu Missverständnissen und langen Laufzeiten führen. Die Bluebeam Revu GmbH ermöglicht mit der gleichnamigen Software den kollaborativen Informationsaustausch auf Grundlage der 2D-Pläne im pdf-Format [Blue21]. Auf mobilen Endgeräten können kollaborativ Anmerkungen getätigt und in der Cloud verwaltet werden. Im Konkurrenzprodukt PlanRadar kann der Nutzer ergänzend Beanstandungen (Tickets) auf einem 2D-Plan verorten und mit Fotos und Texteingaben an-

reichern. Diese Tickets können direkt in Aufgaben gewandelt und bestimmten Anwendern zugeordnet werden. Die Software kann zudem Nachfristen verwalten und Projektberichte erstellen [Plan21].

Die beispielhaft genannten 2D-basierten Planungs- und Steuerungswerkzeuge ermöglichen es, die etablierte, im Bauwesen weit verbreitete und jedem Akteur bekannte Darstellungsweise der 2D-Pläne kollaborativ zu nutzen und den Arbeitsprozess so effizienter zu gestalten.

### **Building Information Modeling**

Building Information Modeling (BIM) bezeichnet einen Ansatz zur digitalen Modellierung von Gebäuden über den gesamten Lebenszyklus. BIM entwickelt sich seit Jahren zum Standard im Bauwesen; die Nutzung von BIM in der Bauplanung ist in vielen Ländern sogar vorgeschrieben [Borr15, S. 2]. Als einer der Vorreiter in der Nutzung von BIM strebt die Regierung Großbritanniens bis zum Jahr 2025 eine Kostenreduktion um 33% sowie eine Durchlaufzeitreduzierung von 50% für das Bauen nach BIM-Standard an [HMGo13, S. 5]. Vielen der hochgesteckten Ziele liegt nach Daniotti ein strukturierter und ungebrochener Informationsfluss zugrunde [Dani20, S. 169]. Der BIM-Ansatz hat zum Ziel, aufwändige und fehleranfällige Wiedereingaben von Informationen zu vermeiden, um so die Planungseffizienz zu steigern [Borr15, S. 1]. BIM zeichnet sich durch einen starken Fokus auf 3D-Daten aus und unterscheidet sich daher grundsätzlich von den zuvor genannten Systemen mit zweidimensionalen Ansichten.

Das mobile Assistenzsystem der Firma vGIS konzentriert sich auf die positionsrichtige Überlagerung von 3D-BIM-Daten vor, während und nach der Durchführung von Bauprojekten. Das System verspricht die Erkennung von Kollisionen (z. B. durch Konstruktionsfehler) um bis zu 50% zu beschleunigen [vGIS21]. GAMMA AR bietet ein Augmented-Reality-fähiges Assistenzsystem zur baubegleitenden Visualisierung von 3D- und weiteren BIM-Daten. Die Überlagerung der Konstruktionsdaten mit dem aktuellen Bauzustand ermöglicht es, Fehler frühzeitig zu entdecken, bebilderte Annotationen vorzunehmen, den im BIM-Modell hinterlegten Baufortschritt anzuzeigen sowie mehrere Modelle und Entwürfe direkt vor Ort zu evaluieren [Gamm21].

Für kollaborative Arbeitsprozesse liegt ein wesentlicher Vorteil von BIM in der strengen Definition standardisierter Datenformate; BIM kann so die Austauschfähigkeit zwischen Akteuren und Werkzeugen garantieren [Dani20, S. 169], die den Standard anwenden. Die von BuildingSMART ins Leben gerufenen (teilweise ISO-) Standards decken hierbei sowohl monolithische Geometriedaten und zugehörige Attribute (Industry Foundation Classes: IFC) als auch Daten ab, die während des Arbeitsprozesses ausgetauscht werden (Open BIM Collaboration Format: BCF) [Build21].

Das BCF-Datenformat eignet sich zudem sehr gut als Basis für die Meldung von Prozessstörungen in strukturierter Form. Neben textuellen Inhalten bieten Metadaten wie eine Kameraperspektive die Möglichkeit, den Aufwand zur Erstellung, Übermittlung und Interpretation der Störung deutlich zu verringern [Rost18, S. 319].

BIM bietet Strukturen für eine 3D-basierte Kollaboration. Heutige Systeme dringen jedoch nicht zur operativen Ebene durch [Dani20, S. 168]. Insbesondere in der manuellen Montage bedarf es eines Systems, das genau auf die Bedürfnisse des Anwenders zugeschnitten ist und diesen mit sämtlichen Informationen und Funktionen für unterschiedlichste Belange unterstützen.

### 3 Problemstellung und Lösungsweg

Das vorangegangene Kapitel hat die Herausforderungen der Unikatproduktion im Allgemeinen und kollaborativer Arbeitsweisen im Speziellen beleuchtet und einen allgemeinen Überblick über relevante digitale Assistenzsysteme geliefert. Im Folgenden wird die übergeordnete Problemstellung kollaborativer Arbeit in der Unikatproduktion noch einmal zusammengefasst (Abschnitt 3.1). Es werden die verfügbaren Lösungsansätze diskutiert und vier konkreten Einsatzszenarien zugeordnet (Abschnitt 3.2). Trotz der verfügbaren Ansätze verbleiben Herausforderungen (Abschnitt 3.3), dessen Lösung einen strukturierten Ansatz benötigt (Abschnitt 3.4).

#### 3.1 Problemstellung

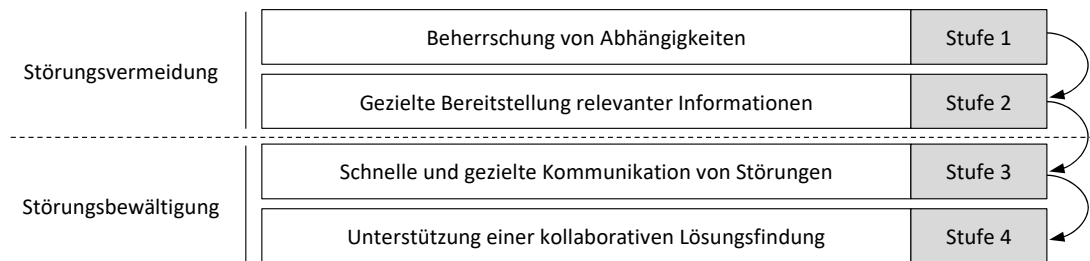
Die Unikatproduktion ist von einer hohen Produktkomplexität und -individualität gekennzeichnet. Dies begünstigt Informationsdefizite. Infolgedessen sind die Produktionsprozesse häufig von Störungen betroffen. Im Störungsmanagement wird grundsätzlich zwischen einer Vermeidung und einer Bewältigung von Störungen unterschieden. Zwar sind die grundsätzlichen Ursachen für Störungen bekannt, jedoch lassen sich diese aufgrund der vielfältigen Störeinflüsse und der hohen gegenseitigen Abhängigkeiten in der Praxis nicht vollständig vermeiden, sondern nur verringern. Problematisch ist, dass sich Störungen aufgrund starker Abhängigkeiten zwischen einzelnen Produktionsprozessen auf parallele oder nachfolgende Prozesse auswirken und dort zeit-, kosten- oder qualitätswirksame Folgeprobleme (Sekundärstörungen) hervorrufen. Die Bewältigung von Störungen und insbesondere ihrer Ausbreitung ist somit elementar, um die Zielerreichung in der Unikatproduktion zu verbessern. In der Praxis ist es aus mehreren Gründen schwierig, die Ausbreitung von Störungen zu verhindern oder zu begrenzen: Zunächst ist dem Verursacher häufig nicht bewusst, welche anderen Prozessteilnehmer von der Störung betroffen sind, da die komplexen Prozesszusammenhänge für den einzelnen nicht offensichtlich sind. Gerade wenn andere Fachdisziplinen betroffen sind, kann der Verursacher einer Störung ihre Schwere für den nachgelagerten Prozess und somit auch die Priorität der Störung nicht einschätzen. Zuletzt werden Störungen häufig erst in den nachgelagerten Prozessen bemerkt. Der Verursacher ist zu diesem Zeitpunkt jedoch bereits in andere Arbeiten involviert, so dass Nacharbeiten aufwändig sind und den organisatorischen Ablauf erheblich beeinflussen.

Zwar existieren sowohl Technologien als auch Ansätze, um beispielsweise Informationen gezielt für Werker bereitzustellen (und so Störungen zu vermeiden), diese verfügen jedoch nicht über die notwendigen Werkzeuge, um neu entstehende Informationen (beispielsweise zu Störungen) gezielt zu kommunizieren. So ist die Erzeugung und Zuordnung von Störungsmeldungen in Planungs- und Steuerungswerkzeugen aufwändig bzw. nicht möglich. Andere Ansätze lassen sich nur schwer an die vorhandenen IT-Systeme der vielen Prozessbeteiligten ankoppeln oder verlieren aufgrund des alleinigen Bezugs auf 2D-Pläne den Bezug zur Produktstruktur.

Zusammenfassend existiert kein integriertes System, das Störungen auf Werkerebene (denn dort entstehen und wirken Störungen) in einem prozess- und unternehmensübergreifenden Kontext begegnet. Im Folgenden werden als Grundstein für eine Lösungsfindung vier Einsatzszenarien definiert und anhand derer bestehende Ansätze klassifiziert und ein Lösungsweg abgeleitet.

### 3.2 Einsatzszenarien und bestehende Lösungsansätze

Wie im vorigen Abschnitt angeführt, lassen sich die Störungsursachen in der betrieblichen Praxis nur bedingt abstellen. Es bedarf daher eines Vorgehens, um Störungen zu begegnen und diese (bzw. deren Ausbreitung) zu bewältigen. Die bestehenden Lösungsansätze lassen sich in vier Gruppen zusammenfassen. Wie nachfolgend näher erläutert wird, weisen die Ansätze jeder Stufe jedoch systematische Defizite auf und können die in der Unikatproduktion gegenwärtigen Herausforderungen nicht in ausreichendem Maße bewältigen, sodass trotz guter Ansätze weiterhin Störungen auftreten, sich fortpflanzen und Produktivitätsverluste hervorrufen.



14362

Abbildung 15: Vier Stufen zur Störungsvermeidung und -bewältigung in der Unikatproduktion

#### Stufe 1: Beherrschung von Abhängigkeiten

Insbesondere die Prozesse im Innenausbau der Unikatproduktion sind von einer Vielzahl von Abhängigkeiten geprägt. Viele Gewerke arbeiten eng getaktet oder auch parallel und teilen sich einen gemeinsamen Bauraum. Die Parallelisierung dieser Teilprozesse ist ein wichtiger Stellhebel zur Reduzierung der Durchlaufzeit (vgl. Abschnitt 2.1.3). Eine hohe Parallelisierung erfordert jedoch, die Arbeitsfortschritte der einzelnen Arbeitsgänge aufeinander abzustimmen. Dies gilt insbesondere im Falle von Störungen, da ansonsten selbst kleine Störungen kurz nach dem Auftreten abhängige Teilprozesse beeinflussen würden. Ist der Arbeitsfortschritt hingegen transparent, wird der Störungsauftritt frühzeitig bemerkt, selbst wenn keine konkrete Meldung erfolgt ist.

Wie eingangs erwähnt, ist es problematisch, wenn den Akteuren der Einblick in die komplexen Zusammenhänge und Abläufe im Baubereich fehlt und sie deswegen die Auswirkungen von Störungen nicht einschätzen können. Zeitliche Puffer zwischen Teilprozessen verringern zwar die Auswirkungen von Störungen oder kompensieren diese sogar vollständig. Sie verlängern jedoch die Durchlaufzeit, sodass ein Zielkonflikt zwischen einer hohen Robustheit und einer kurzen Durchlaufzeit entsteht.

Werker-Assistenzsysteme zielen heute vor allem darauf ab, Informationen für den Werker aufzubereiten und bereitzustellen. Insbesondere die Lösung von Halata [Hala18, S. 83] zeigt darüber hinaus jedoch, dass es Arbeitspläne auf Bauteilebene ermöglichen, den Arbeitsfortschritt (oder auch Abweichungen vom geplanten Fortschritt) mit wenig Aufwand detailliert zu erfassen (vgl. Abschnitt 2.4.1). Die Verknüpfung von Arbeitsplänen und 3D-Modellen des Produkts liefert darüber hinaus implizit eine Information über mögliche Schnittstellen zu anderen Gewerken, dessen Arbeiten beispielsweise an derselben Baugruppe oder im selben Baubereich stattfinden.

Es stellt sich daher die Frage, inwieweit eine Erweiterung des von Halata vorgestellten Ansatzes für

ein Werker-Assistenzsystem um diese Funktionalitäten das Potenzial bietet, Transparenz über Abhängigkeiten, Fortschritte und aufkommende Störungen zu schaffen, um so zur Beherrschung der Abhängigkeiten beizutragen.

### **Stufe 2: Gezielte Bereitstellung relevanter Informationen**

Fehlende Informationen sind eine der Hauptursachen für Prozessstörungen (vgl. Abschnitt 2.2). Insbesondere in abhängigen Arbeitsprozessen kommt erschwerend hinzu, dass selbst verfügbare Informationen nicht immer dort sind, wo sie benötigt werden. Halata konnte mit seinem Konzept zur Augmented-Reality-gestützten Informationsbereitstellung zeigen, wie die Beschaffung der notwendigen Informationen mithilfe einfacher Werkzeuge durch den Werker die Produktivität des Arbeitsprozesses verbessern kann. Ähnliche Ergebnisse wurden auch in der (Klein-) Serienproduktion erreicht, wobei die dort verwendeten Systeme das individuelle Erstellen der Inhalte voraussetzen und dies bei Losgröße eins zu einem hohen Zusatzaufwand führen würde.

Die gezielte Bereitstellung relevanter Informationen kann insbesondere die Nebenzeiten zur Informationsbeschaffung reduzieren und so im Idealfall einen reibungslosen Ablauf ermöglichen. Schließt man nun Informationen über Arbeitsfortschritte und Störungen in die Informationsbereitstellung mit ein, so nimmt die Menge zu verarbeitender Informationen weiter zu und wird zunehmend unübersichtlich. Ferner sind häufig mehrere Informationen miteinander zu verknüpfen, um für den eigenen Arbeitsprozess relevante Schlussfolgerungen abzuleiten.

Es stellt sich daher die Frage, inwieweit die aufgezeigten Werkzeuge verändert werden müssen, um den Anwender bei der Verknüpfung und Interpretation der erweiterten Informationsbasis adäquat zu unterstützen und so auch in kollaborativen Prozessen eine Produktivitätssteigerung zu fördern.

### **Stufe 3: Schnelle und gezielte Kommunikation von Störungen**

Da sich Abhängigkeiten zwar verringern, aber nicht vermeiden lassen und die gezielte Informationsbereitstellung zwar im Einzelfall sehr hilfreich ist, jedoch nicht vor fremdinduzierten Störungen im kollaborativen Prozess schützt, sind Störungen möglichst schnell zu kommunizieren, um Folgeschäden gering zu halten.

Bei komplexen Unikatprodukten liegen Abhängigkeiten in der Regel gleich zwischen mehreren prozessbeteiligten Gewerken vor. Eine intensive Fremdvergabe führt erschwerend dazu, dass die abhängigen Prozessbeteiligten häufig einander unbekannt sind, was eine zielgerichtete Kommunikation erschwert. Daher werden Werkzeuge benötigt, die mehrere parallele Arbeitsprozesse adressieren und die Abhängigkeiten zwischen den Prozessen berücksichtigen. Das Zusammenarbeiten vieler (einander häufig unbekannter) Parteien auf engem Raum und die Nutzung gemeinsamer Ressourcen (während auf allen Beteiligten ein hoher wirtschaftlicher Druck lastet) erfordert rasche, ortsbezogene Abstimmungen.

Durch intensive, direkte Kommunikation lassen sich Störungen zwischen den beteiligten Bereichen klären. Hierzu ist es jedoch notwendig, dass sich der Störungsverursacher der Folgen und der betroffenen Bereiche bewusst ist. Prozessbeteiligte können dies jedoch oftmals nicht abschätzen, so dass es zu Abstimmungsproblemen an organisatorischen Schnittstellen kommt [Gron19, S. 35]. Die

Praxis begegnet dem Problem häufig durch wöchentliche Abstimmungstermine der beteiligten Gewerke in den jeweiligen Baubereichen. Der wöchentliche Rhythmus führt jedoch in der Regel zu mehrtägigen Verzögerungen in der Kommunikation. Technisch ist eine schnelle Kommunikation unproblematisch, wie z. B. einfache digitale Kollaborationswerkzeuge zeigen (vgl. Abschnitt 2.4.2), die sekundenschnell Informationen zwischen einzelnen oder mehreren Akteuren austauschen. Es stellt sich jedoch die Frage, wie ein zielgerichteter und gleichzeitig problemorientierter Informationsaustausch gestaltet werden kann und inwieweit sich dieser in die bestehenden Systeme zur Informationsbereitstellung integrieren lässt (z. B. zur Vermeidung widersprüchlicher Informationen).

### **Stufe 4: Unterstützung einer kollaborativen Lösungsfindung**

Lässt sich eine Störung nicht direkt durch den Werker selbst lösen, werden Dritte, wie Kollegen, der Bauleiter oder auch Mitarbeiter indirekter Bereiche wie der Arbeitsvorbereitung oder der Konstruktion involviert. Die kollaborative Lösungsfindung zwischen diesen Parteien beschränkt sich heute zu meist auf klassische Kommunikationsmittel wie Telefonate, E-Mails oder Textnachrichten. Dies hat den Nachteil, dass Störungen und später auch dessen Lösungen aufwändig beschrieben oder z. B. durch Fotos oder Skizzen dokumentiert werden müssen. Neben hohen Aufwänden entstehen dadurch häufig auch Missverständnisse.

Digitale Kollaborationswerkzeuge zur 2D-basierten Kommunikation von Störungen (vgl. Abschnitt 2.4.2) schaffen hier nur zum Teil Abhilfe: Zwar ist die Verortung der Störung auf dem 2D-Plan für alle Beteiligten hilfreich und die fallbasierte Abwicklung einer Störung auch in Hinblick auf Dokumentation im Sinne von Lessons Learned deutlich besser, jedoch ist die textuelle Abwicklung immer noch von Aufwänden und Missverständnissen begleitet. Ferner sind die Adressaten derartiger Lösungen vorrangig die indirekten Bereiche und es existiert keine Integration in ein Arbeitsplan-basiertes Werker-Assistenzsystem. BIM-gestützte Werkzeuge für operative Mitarbeiter konzentrieren sich auf die unidirektionale Bereitstellung statischer Informationen und unterliegen daher den zuvor genannten Defiziten der heutigen Systeme zur gezielten Bereitstellung relevanter Informationen. Es mangelt auch hier an Werkzeugen zur Verwaltung der dynamischen Inhalte [Dani20, S. 168]. Es stellt sich somit die Frage, wie ein integriertes System zu gestalten ist, das einen effizienten bidirektionalen Austausch lösungsorientierter Informationen zu bestehenden Störungen gewährleistet.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Abhängigkeiten in der Unikatproduktion unausweichlich sind. Auch lassen sich Störungen trotz geeigneter Lösungen zur Bereitstellung relevanter Informationen nicht vollständig vermeiden. Wiederum liegt das Problem jedoch nicht bei den Lösungen selbst, sondern vielmehr in der Natur des hochkomplexen Produktionsprozesses. Als wesentliche Lösungsprinzipien verbleiben die Verbesserung einer schnellen und vor allem zielgerichteten Kommunikation auftretender Störungen sowie die Erarbeitung von Werkzeugen zur Unterstützung einer kollaborativen Lösungsfindung.

## **3.3 Herausforderungen**

Das Zusammenwirken vieler unterschiedlicher Fachdisziplinen ermöglicht es, technisch höchst anspruchsvolle Produkte in kurzer Zeit herzustellen. Es ist jedoch notwendig, die negativen Effekte kollaborativer bzw. abhängiger Arbeitsprozesse abzuschwächen bzw. zu vermeiden, Informationsflüsse

zu beschleunigen und eine kollaborative Lösungsfindung zu unterstützen.

Digitale Assistenzsysteme eignen sich in der richtigen Konfiguration in besonderem Maße dazu, manuelle Arbeitsprozesse (insbesondere in der Unikatproduktion) zu unterstützen, da sie detaillierte Arbeitsanleitungen aus dem CAD-Modell ableiten können und darüber hinaus den Werkern mit geeigneten Werkzeugen (z. B. Messwerkzeug) die Möglichkeit geben, fehlende Informationen schnell und selbstständig zu beschaffen (vgl. Abschnitt 2.4.1). Auch existiert eine Vielzahl grundlegend geeigneter digitaler Kollaborationswerkzeuge. Wie in den vorigen Abschnitten aufgezeigt, birgt die Unterstützung kollaborativer Arbeitsprozesse mit digitalen Assistenzsystemen jedoch Herausforderungen, die es zu lösen gilt.

Für eine erfolgreiche Kollaboration müssen Prozessbeteiligte ihre Aktivitäten synchronisieren und die richtigen Personen müssen zur richtigen Zeit Informationen austauschen [Wout17, S. 1]. Die zentrale Herausforderung besteht darin, diesen **gezielten und bidirektionalen Informationsaustausch schnell und aufwandsarm sowohl horizontal zwischen den Teilprozessen als auch vertikal zwischen Werkern und Bauleitern zu ermöglichen**. Es gilt Werkzeuge und Mechanismen zu erarbeiten, die es den Beteiligten unterschiedlicher Fachrichtungen ermöglichen,

### als Sender

- die notwendigen Informationen einfach oder sogar automatisch zu protokollieren,
- dem richtigen Empfänger (-Kreis) zuzuordnen und
- schnell zu übermitteln und

### als Empfänger

- die Information leicht zu verstehen,
- geeignete Maßnahmen abzuleiten und
- an die betroffenen Beteiligten auf unterschiedlichen Hierarchieebenen und in unterschiedlichen Unternehmen zu kommunizieren.

Ziel ist es, so Informationsbedarfe und -verfügbarkeiten aufeinander abzustimmen und Informationsdefizite sowie -redundanzen zu vermeiden.

Wesentliches Hemmnis für den Austausch von Aktivitäten und Informationen über die Grenzen von Fachbereichen oder Unternehmen hinweg ist eine **fehlende gemeinsame Kommunikationsgrundlage**. Die Prozessbeteiligten benötigen ein einheitliches Begriffsverständnis, um Missverständnisse zu vermeiden und eine zielorientierte Kommunikation zu ermöglichen [Wout17, S. 3ff.]. Firmeninterne Sachnummern oder Flächenbezeichnungen erleichtern zwar die interne Kommunikation, führen bei externer Kommunikation jedoch zu erheblichen Problemen.

Störungen entstehen und wirken im direkten Bereich. Um eine schnelle Kommunikation zu gewährleisten, ist es daher notwendig, Probleme unmittelbar nach der Entstehung zu dokumentieren. Hierzu müssen vor allem die **direkten Bereiche in den Prozess einbezogen** werden. Gleiches gilt für die Darstellung gemeldeter Probleme: Liegt eine Störung oder gar ein Baustopp vor, so können ggf. Nebenzeiten (z. B. zur Material- und Hilfsmittelbeschaffung) vermieden werden, indem die Beteiligten im direkten Bereich rechtzeitig informiert werden.

Abschließend ist es eine zentrale Herausforderung, die notwendigen Werkzeuge und Mechanismen möglichst in bestehende Konzepte zur unidirektionalen (meist initialen) Bereitstellung von Informationen für operative Mitarbeiter zu integrieren, um so Medienbrüche, Mehrdeutigkeiten und Redundanzen zu vermeiden und Synergien hinsichtlich etablierter bzw. bestehender Bedien- und Visualisierungskonzepte auszunutzen.

### 3.4 Lösungsweg zur Bestimmung der wesentlichen Handlungsfelder

Ein häufiges Problem der Unternehmenskommunikation ist es, nicht aus Sicht der Bezugsperson zu denken [Mast20, S. 159]. Da sich der Kreis der Bezugspersonen über mehrere Hierarchieebenen, Fachbereiche und Unternehmen verteilen kann, sind zunächst die Widrigkeiten und Anforderungen dieser prozeduralen Übergänge zu analysieren. Ferner ist zu untersuchen, welche Akteure bzw. Bezugsgruppen im Produktionsprozess in besonderem Maße von Abhängigkeiten und Informationsdefiziten betroffen sind, um diese Gruppen im Folgenden detaillierter analysieren zu können.

Zur Konzeption der notwendigen Werkzeuge und Mechanismen ist es notwendig, die besonders einflussreichen Störungen zu erfassen und ihre Ursachen und gegenwärtigen Entstör-Mechanismen zu untersuchen. Diese Betrachtung erlaubt eine Bewertung, inwieweit einzelne Störungstypen

1. durch eine gesteigerte Transparenz des übergeordneten Prozesszusammenhangs in ihrer Fortpflanzung gehemmt,
2. durch eine schnellere, gezieltere oder umfassendere Informationsbereitstellung (vgl. Abbildung 15, Stufe 2) vermieden,
3. schneller und gezielter kommuniziert (vgl. Abbildung 15, Stufe 3), oder
4. durch umfangreichere Werkzeuge zur kollaborativen Lösungsfindung besser bewältigt werden können (vgl. Abbildung 15, Stufe 4).

Ergänzend ist die gegenwärtige Versorgung der Akteure mit Informationen zu hinterfragen. Es stellt sich die Frage, welche Informationen benötigt werden, woher diese bezogen werden und inwieweit die Quellen zur Bereitstellung geeignet sind. Z. B. werden Materialdisponenten häufig telefonisch von operativen Mitarbeitern kontaktiert, um Lagerorte zu erfragen. Die Disponenten schlagen die Information im Materialwirtschaftssystem nach, geben sie weiter und fungieren so lediglich als (unwirtschaftliche) Brücke zur eigentlich einfach zugänglichen Informationsquelle. Es gilt, diese Treiber unwirtschaftlicher Informationsversorgung zu identifizieren, um so die Notwendigkeit und damit verbundenen Anforderungen einzubeziehender Informationsquellen bzw. IT-Systeme aufzuzeigen.

## 4 Kollaborative Arbeitsprozesse in der Unikatproduktion

Nachdem die Herausforderungen der Unikatproduktion sowie gegenwärtiger Lösungsansätze in den vorangegangenen Kapiteln von theoretischer Seite beleuchtet wurden, schließt das vorliegende Kapitel an die im formulierten Lösungsweg geforderten Analyseschwerpunkte an und liefert einen vertieften Einblick in die Praxis. Zunächst werden die Abläufe der Ausrüstungsmontage sowie die grundlegende Problematik verteilter Informationen und kollaborativer Abläufe im allgemeinen Ausrüstungsprozess erörtert (Abschnitt 4.1). Abschnitt 4.2 ergänzt die bisherigen, theoretischen Vorüberlegungen zu Prozessstörungen zum einen um Prozessanalysen in der Industrie. Zum anderen zeigt eine Analyse, wie sich die Störungen im Prozessablauf auswirken und verteilen, so dass auch ihre Wirkung auf die unterschiedlichen Formen der Kollaboration abgeleitet werden kann. Ein wesentlicher Teil der Störungen ist auf eine mangelhafte Versorgung der Werker mit Informationen zurückzuführen. Daher werden der Informationsbedarf und gegenwärtige Informationsquellen analysiert und diskutiert, so dass Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet werden können (Abschnitt 4.3). Abschließend werden anhand von vier Handlungsfeldern die Anforderungen an das Lösungskonzept erarbeitet (Abschnitt 4.4). Die Handlungsfelder stehen hierbei in direktem Zusammenhang mit den zuvor definierten Einsatzszenarien.

Die Ergebnisse dieser Arbeit und insbesondere die nachfolgend vorgestellten Analysen sind in enger Zusammenarbeit mit mehreren Industrieunternehmen entstanden. Zwischen den Jahren 2016 und 2022 fanden hierzu zahlreiche Besuche, Prozessbegleitungen und Experteninterviews bei den nachfolgend aufgeführten Produzenten und Zulieferbetrieben statt:

- Luftwerft für den Ausbau von Flugzeugkabinen
- Schiffswerft für den Bau von Kreuzfahrtschiffen
- Schiffswerft (international) für den Bau von Expeditionsschiffen
- Zulieferbetrieb für Schaltanlagen im Schiff- und Anlagenbau
- Zulieferbetrieb für Kompressoren, Winden und Ruderanlagen
- Zulieferbetrieb für Antriebsmaschinen im Schiffbau
- Zulieferbetrieb für Innenausbau im Schiffbau

Es wurden drei unterschiedliche Methoden angewandt, um die notwendigen Analysen durchzuführen:

1. Allgemeine Prozessbeobachtungen (qualitativ)
2. Detailanalyse der Störungsentstehung (qualitativ / quantitativ)
3. Detailanalyse der Entstörung (qualitativ / quantitativ)

Details zu den Methoden und den jeweiligen Randbedingungen werden in den nachfolgenden Abschnitten an den relevanten Stellen ausgeführt.

### 4.1 Grundlegender Arbeitsprozess

Die folgenden Unterabschnitte identifizieren die im Produktionsprozess primär an der Entstehung, Erkennung und Behebung von Störungen beteiligten und von ihren Auswirkungen betroffenen Bezugsgruppen. Ziel ist es, so den Betrachtungsbereich der nachfolgenden Analysen festzulegen. Die

Grundlage hierfür sind mehrere Prozessbegleitungen in der Industrie, die es ermöglichen, die speziellen Herausforderungen des allgemeinen Ausrüstungsprozesses zu erfassen (Abschnitt 4.1.1). Im Rahmen der Prozessbegleitungen wurden die Ergebnisse mit den beteiligten Akteuren (Abschnitt 4.1.2) diskutiert, um die Ursachen und Hintergründe der gegenwärtigen Informationsverteilung zu verstehen (Abschnitt 4.1.3). Abschnitt 4.1.4 fasst die Notwendigkeit und die damit verbundenen Herausforderungen von Kollaboration im allgemeinen Prozess zusammen.

### **Randbedingungen: Allgemeine Prozessbeobachtungen**

Mit sämtlichen eingangs genannten Unternehmen wurden persönliche, bilaterale Gespräche sowie Gruppendiskussionen geführt. Es waren sowohl Werker und Bauleiter als auch verantwortliche Mitarbeiter indirekter Bereiche beteiligt. Insgesamt wurden auf einer Schiffswerft 14 Schichten mehrerer Bauleiter des Innenausbau, je eine halbe Schicht eines Bereichsverantwortlichen, eines technischen Zeichners, eines Arbeitsvorbereiters sowie eines Lageristen begleitet. Die Begleitung fand durch mehrere (darunter auch der Autor) wissenschaftliche Mitarbeiter des Instituts für Produktionsmanagement und -technik der TU Hamburg statt.

Ergänzend wurden durch studentische Mitarbeiter insgesamt acht Schichten von zwei Mitarbeitern des Innenausbau begleitet. Die Ergebnisse wurden im Dialog mit dem Autor sowie in anschließenden Gesprächen mit den Mitarbeitern ausgetauscht und sind unmittelbar in diese Arbeit eingeflossen.

### **4.1.1 Allgemeiner Ausrüstungsprozess**

Der Bau von Kreuzfahrtschiffen und Luxusyachten, die Einzelausrüstung von Flugzeugkabinen sowie das Bauwesen weisen viele Parallelen auf: Es liegt eine Baustellenfertigung vor, in der die Arbeit nach fachlichen Gewerken organisiert ist. Art und Namensgebung der Gewerke im Hochbauwesen und im Schiffsinnausbau sind nahezu identisch. Der Flugzeugbau weicht mit seinen spezifischen Systemen und international einheitlichen Namensgebungen hiervon ab. Trotzdem ähneln sich große Teile der wertschöpfenden Tätigkeiten der Ausbauprozesse und die dortigen Herausforderungen in allen drei Branchen stark. Die Fertigungstiefe auf Werften ist im Branchenvergleich besonders gering und beschränkt sich zumeist auf den Stahlbau. Zulieferbetriebe (größtenteils kleine und mittelständische Unternehmen) tragen häufig zu mehr als 70% zur Wertschöpfung bei [Bund21, S. 27], [Ludw14, S. 9], [IHKR20, S. 2]. Es ist eine Vielzahl von Fachgruppen und Unternehmen beteiligt, so dass die Struktur der Prozessbeteiligten besonders heterogen ist.

Wie in Abschnitt 2.1.2 dargelegt, zeigen sich wesentliche Herausforderungen in der vom Montagebau dominierten Endausrüstung. Unter Montagebau wird die Montage von Baufertigteilen, Unterkonstruktionen, Kabelträgersystemen sowie das Einbauen von Fenstern und Türen verstanden [Soka19, S.10]. Betrachtet man beispielhaft den Wandaufbau eines Schiffs, so stellt der Rohbau (auch Stahlbau) die Grundlage der späteren Installationen dar. Darauf werden Installationen wie Verkabelungen und Verrohrungen sowie die Unterkonstruktion der später sichtbaren, dekorativen Elemente montiert. Diese dekorativen Elemente bilden die Schnittstelle zum Endkunden, so dass sie für die wahrgenommene Qualität des Gesamtprodukts besonders wichtig sind. Zugleich sind sie aus Sicht des Produzenten das zentrale Element zur Abgrenzung von Wettbewerbern, weshalb häufig neue

Materialien und ausgefallene Konstruktionen zum Einsatz kommen. Komplexe Verkleidungen erfordern zugleich komplexe Unterkonstruktionen und Installationen.

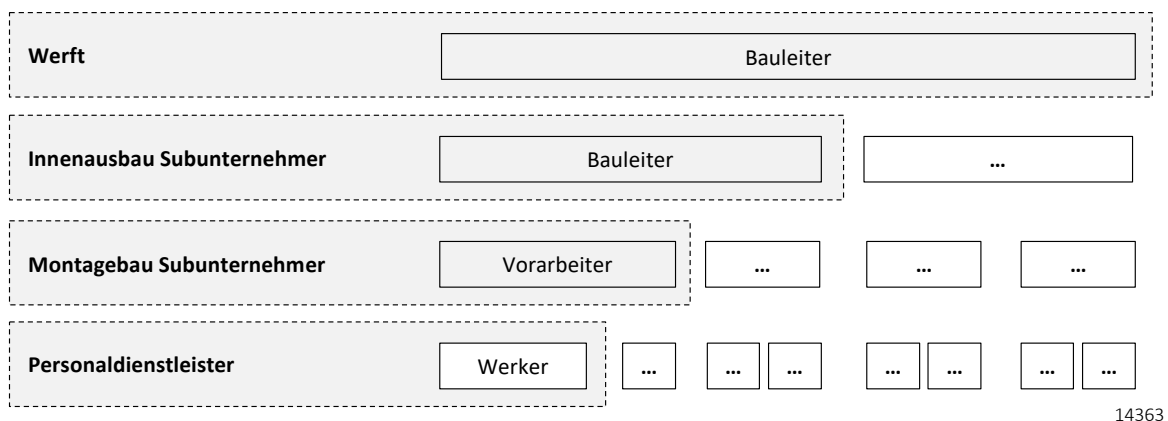
Betrachtet man den Aufbau vom Stahlbau bis zur Verkleidung, steigt die **Individualität der verbauten Materialien** sowie die **Komplexität der Konstruktion**. Dies führt zu einem **Anstieg des Informationsbedarfes**, birgt ein **erhöhtes Fehlerrisiko** und führt somit **vermehrt zu Rückfragen**. Mechanismen zur Konsolidierung von Informationen müssen daher möglichst automatisiert werden, zugleich jedoch robust sein und fehlerfrei auf unbekannte Zusammensetzungen von Baugruppen und Materialien reagieren. Zusätzlich werden effiziente, problemorientierte Kommunikationsmittel benötigt, um auch Rückfragen mit einem hohen Fachbezug schnell klären zu können. Weil der Kunde sichtbare Elemente direkt wahrnehmen kann, sind diese Elemente besonders **häufig von Änderungswünschen betroffen**.

Für die unterschiedlichen konstruktiven Elemente sind aufgrund der hohen individuellen fachlichen Anforderungen in der Regel einzelne Gewerke zuständig. Insbesondere bei Spezialeinbauten wie Bühnen oder komplexen Fassadensystemen kommen zudem zusätzliche Gewerke zum Einsatz. Die Vermeidung von Abhängigkeiten (vgl. Stufe 1 in Abbildung 15) ist aufgrund der Gegebenheiten nicht möglich, weil zum einen ein hoher Kompetenzbedarf vorliegt und zum anderen eine vollständige Entkopplung der Einzelprozesse durch Puffer aufgrund der Menge beteiligter Gewerke in hohem Maße unwirtschaftlich wäre. Im Folgenden werden die Struktur beteiligter Akteure und die damit einhergehenden Herausforderungen näher beleuchtet.

#### 4.1.2 Akteure im Produktionsprozess

Aufgrund der geringen Fertigungstiefe weisen Ausrüstungsprozesse einfacher Montagebauten im Schiffbau eine besonders starke Hierarchisierung auf (vgl. Abbildung 16). Die folgenden Zusammenhänge werden daher am Beispiel einer Werft erläutert.

In der Regel überwacht der Bauleiter einer Werft die Ausrüstungsprozesse eines definierten Bereichs und koordiniert den groben Terminplan. Zu seinen weiteren Aufgaben zählen auch die Einhaltung werftseitiger Sicherheitsvorschriften sowie die kontinuierliche Verbesserung der Produktionsabläufe.



14363

Abbildung 16: Akteure im Produktionsprozess einer Werft

Großflächige Ausbaubereiche werden häufig per Werkvertrag an Subunternehmer vergeben. Der

Großteil der Produktkomplexität wird so an den externen Produzenten abgegeben. Um beispielsweise Installationen fachgerecht durchzuführen und dekorative Elemente effizient aufzubauen, vergibt der Innenausbau-Subunternehmer wiederum kleinere Arbeitspakete an Fachgewerke, wie beispielsweise einen Montagebau-Subunternehmer, und setzt seinerseits Bauleiter ein, um diese zu koordinieren. Die Fachgewerke führen die Baumaßnahmen aus und setzen hierzu eigene Vorarbeiter zur Koordination mehrerer Werker und zur Bauausführung ein. Je nach Bedarf werden die sogenannten Montagetrupps mit externen Kräften von Personaldienstleistern aufgestockt.

Tritt ein Problem bei der Montage auf, so wird stufenweise versucht, eine Lösung zu finden. Gelingt dies nicht, wird das Problem vertikal an die darüber liegende Ebene eskaliert. Änderungen von Kunden, der Werft oder der Konstruktion des Subunternehmers, werden ebenfalls vertikal, jedoch von oben nach unten, kommuniziert. Wenn sich eine Störung auf parallel arbeitende Gewerke auswirkt, so ist dies zumeist nicht unmittelbar offensichtlich. Zu diesem Zweck werden unternehmensübergreifende Baustellenbegehungen auf Bauleiterebene durchgeführt, in denen offene Punkte diskutiert und Maßnahmen horizontal abgestimmt werden. Wiederum werden entsprechende Änderungen und Anweisungen vertikal von oben nach unten an die Subunternehmer kommuniziert.

Die beschriebenen Akteure unterscheiden sich in der Regel im Ausbildungsgrad, in ihrer Kompetenz bei der Bedienung digitaler Medien sowie in ihren Sprachkenntnissen. Insbesondere auf operativer Ebene liegt häufig eine hohe Personalfluktuation vor. Es ist daher vorteilhaft, Informationen intuitiv und mit wenig textuellen Bestandteilen darzustellen. Das Bedienkonzept muss einfach zu handhaben und möglichst ohne Schulungsaufwand zu erlernen sein.

Mobile Lösungsansätze sind erforderlich, weil sich die beschriebenen Akteure frei auf der Baustelle bewegen: Die Prozessbeobachtungen insbesondere im Schiffbau zeigen, dass Vorarbeiter in der Regel mehrere Trupps betreuen und sich hierbei zwischen den einzelnen Baubereichen bewegen. Zugleich sind sie jedoch an der Ausführung beteiligt. Bauleiter von Subunternehmern agieren zumeist sternförmig von zentralen Punkten im Baubereich und Bauleiter der Werften bewegen sich kontinuierlich durch den Baubereich.

### 4.1.3 Dilemma verteilter Informationen

Viele Informationen sind nur für eingeschränkte Personenkreise zugänglich, da sie für andere Bereiche nicht relevant sind. In abhängigen Arbeitsprozessen existieren jedoch Informationen, deren Austausch für die Kollaboration von zentraler Bedeutung ist: Teilen sich zwei Arbeitsprozesse den gleichen Bauraum, so sind Verzögerungen des einen Prozesses unmittelbar für den anderen relevant. Bauen Prozesse konstruktiv aufeinander auf, so wirken sich Qualitätsprobleme des einen unmittelbar auf die Qualität des anderen aus.

Die Prozessbeobachtungen haben gezeigt, dass insbesondere Informationen über den Arbeitsfortschritt sowie über Störungen einem Anreizdilemma unterliegen: Diese Informationen sind an einem Ort verfügbar, werden jedoch an einem anderen benötigt. Die **mit Aufwand verbundene Weitergabe** erzielt am Ursprungsort jedoch **keinen unmittelbaren Nutzen**. Erschwerend kommt hinzu, dass die starke Hierarchisierung und Arbeitsteilung die **Gesamtsituation für den einzelnen Akteur intransparent** macht und **mögliche Nutznießer der eigenen Informationen nicht unmittelbar bekannt** sind. Selbst wenn die Urheber einer Information trotz des dafür notwendigen Aufwands dazu bereit sind,

die Information weiterzugeben, lässt sich ein zielgerichteter Informationsfluss nur schwer realisieren. Als Folge entstehen die in Abbildung 17 exemplarisch dargestellten Kommunikationsketten, in denen Bauleiter und Vorarbeiter als Bindeglied auf der jeweiligen Ebene fungieren und die verfügbaren oder benötigten Informationen an die darüber bzw. darunterliegende Ebene weiterreichen.

Durch die gegenwärtige Hierarchisierung findet mit der Informationsübermittlung eine Aggregation (von unten nach oben) bzw. Separation (von oben nach unten) statt. Die Übergänge sind hierbei geprägt von **Medienbrüchen** und **langen Wartezeiten und Laufwegen**. Dadurch besteht die Gefahr, das Gesamtbild auf oberster Ebene durch zeitliche Verzögerungen und inhaltliche Abweichungen zu verfälschen und richtungsweisende Entscheidungen auf Basis einer unzureichenden Informationsgrundlage zu treffen.

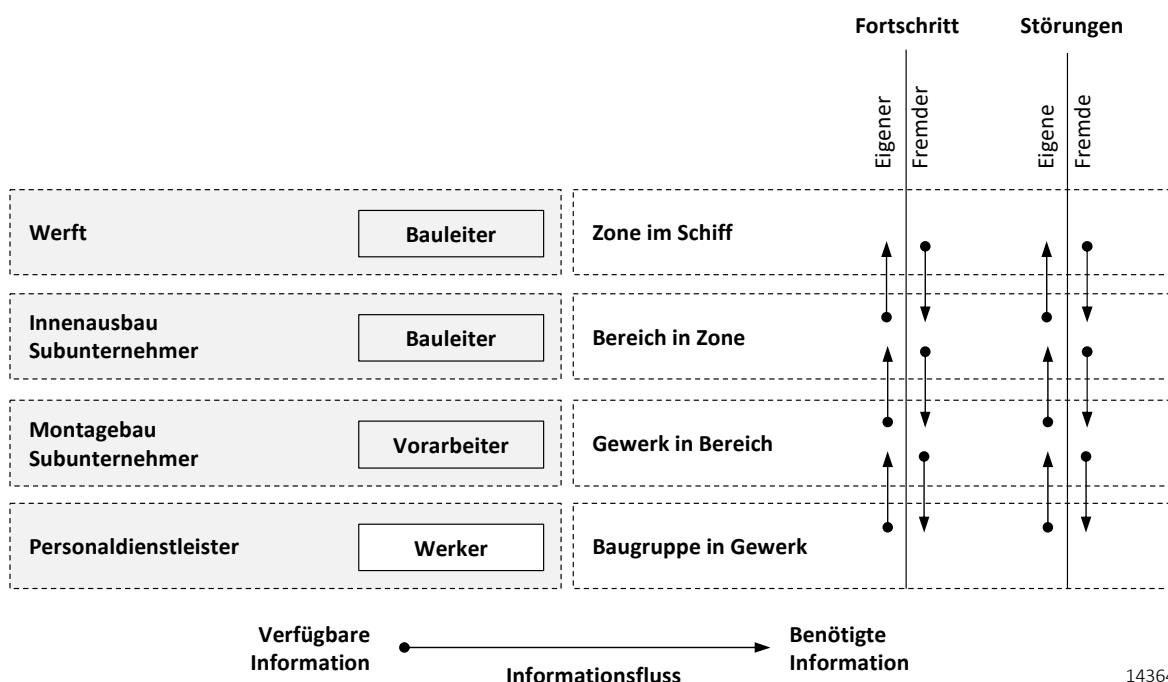


Abbildung 17: Informationsflüsse zwischen Hierarchieebenen auf einer Werft

## Störungen

Auch wichtige Informationen über zeit-, kosten- oder qualitätswirksame Störungen gelangen verzögert bzw. inhaltlich verfälscht über Umwege zum Wirkungsort auf operativer Ebene. Jeder Akteur fährt bis zum Eintreffen der Störungsinformation wie geplant mit der Bauausführung fort und riskiert dadurch **Qualitätsprobleme, Nacharbeiten** oder sogar einen **Rückbau**. Als Folge entstehen **hohe, unvorhergesehene Mehrkosten sowie Zeitverlust**. Die Geschwindigkeit und Eindeutigkeit der Informationsübertragung sind somit direkte Stellhebel für eine Verbesserung des Prozesses. Es sind jedoch nicht nur die technische Geschwindigkeit und Störungsfreiheit der Informationsübermittlung entscheidend, sondern auch die Erzeugung (Kodierung) und Interpretation (Dekodierung) der Information (vgl. Abschnitt 2.3.4): Diese müssen von allen Prozessbeteiligten effizient und eindeutig erzeugt und interpretiert werden können. Zur Vermeidung von Missverständnissen ist den Beteiligten ein einheitliches Bild der gegenwärtigen Situation zu präsentieren.

## Baufortschritt

Neben den Störungen ist der aktuelle Baufortschritt für die Koordination der Unikatproduktion eine sehr zentrale Information: Aus dem Vergleich mit der Planung ergibt sich der Rückstand eines Projektes und damit auch die Dringlichkeit von steuernden Eingriffen. Entsprechend führen Verzögerungen und Ungenauigkeiten ggf. zu einer verzögerten oder falschen Reaktion, mit potenziell erheblichen Folgekosten. Auch die Meldung des aktuellen Baufortschritts ist für den Werker selbst ohne unmittelbaren Nutzen, so dass die Übermittlung bestmöglich durch Werkzeuge und Automatismen unterstützt werden sollte. Wie auch in Abschnitt 3.3 dargelegt, stellt zudem das Finden einer gemeinsamen Kommunikationsbasis sowie eines gemeinsamen Bezugsrahmens eine wesentliche Herausforderung dar, um beispielsweise das Auffinden des richtigen Empfängers einer Information zu erleichtern bzw. zu automatisieren.

### 4.1.4 Kollaboration im allgemeinen Ausrüstungsprozess

In den vorangegangenen Abschnitten wurden Randbedingungen und Herausforderungen eines allgemeinen Ausrüstungsprozesses in der Unikatproduktion identifiziert. Das Zusammenwirken mehrerer Gewerke ist bereits aus konstruktiver Sicht unausweichlich. Durch den geteilten Arbeitsraum entstehen ressourcenbedingte Abhängigkeiten, die eine enge Abstimmung der Prozessbeteiligten erfordern. Durch den schichtweisen Aufbau der konstruktiven Ebenen bilden sich Toleranzketten, sodass die erreichbare Qualität des einen von der Qualität des anderen abhängt.

Die Analyse der Arbeitsprozesse sowie daran beteiligter Akteure hat den Bedarf für eine angepasste Lösung zur Unterstützung dieses kollaborativen Arbeitsprozesses hervorgehoben und präzisiert. Es haben sich Anforderungen ergeben, die im weiteren Verlauf ergänzt und in Abschnitt 4.4 als Überblick zusammengefasst werden. Allgemein zeigt sich, dass die beteiligten Gewerke häufig mehrere Baustellen parallel bearbeiten und Personal in der Regel problemlos zwischen diesen umverteilen können. Problematisch ist jedoch, dass diese Möglichkeit in der Praxis erst genutzt wird, wenn die Arbeiten schon begonnen wurden, da nicht fertige Vorarbeiten oder latente Störungen zuvor nicht bekannt sind. Die schnelle und fehlerfreie Kommunikation von Baufortschritten bzw. Abweichungen vom Sollfortschritt sowie sonstigen Störungen könnte hier Abhilfe schaffen und hat sich als besonders relevant herausgestellt. Um ein umfangreiches Bild über Typen und Verteilungen auftretender Störungen zu erhalten, gilt es, einen geeigneten Betrachtungsbereich für eine tiefergehende Analyse einzugrenzen. Der Montageprozess selbst ist zum einen häufig die Quelle einer Störung, jedoch zugleich auch Haupt-Leidtragender der Auswirkungen. Im ersten Teil der nachfolgenden Analyse werden daher Störungen im Montageprozess näher untersucht, die zu einer direkten Beeinflussung des operativen Mitarbeiters und somit unmittelbar zu einer Verschlechterung der Arbeitsproduktivität bzw. des Prozesswirkungsgrades führen.

Bauleiter und Vorarbeiter nehmen im Prozessablauf die Rolle eines Problemlösers ein. Als direkte Ansprechpartner mehrerer Werker bzw. Vorarbeiter bearbeiten sie eine hohe Zahl von Störungsmeldungen und koordinieren und kommunizieren zudem die Entstör-Maßnahmen. Im zweiten Analyseabschnitt wird daher die Störungsbehandlung auf Bauleiter- / Vorarbeiter-Ebene näher betrachtet. Die Beobachtungen bestätigen, dass eine unzureichende Informationsversorgung häufig die Ursache von Störungen ist. Der dritte Analyseabschnitt untersucht daher Informationsbedarfe und Bezugsquellen im Detail.

## 4.2 Störungen im Prozessablauf

Störungen sind häufig mehrstufige, kausale Ursache-Wirkungsketten [Fisc07, S. 28], [Heil95, S. 32]. Insbesondere in abhängigen Produktionsprozessen können sie nicht nur einen, sondern gleich mehrere Arbeitsprozesse beeinflussen (vgl. Abschnitt 2.2.2): Kommt es zu Verzögerungen bei einem Beteiligten, gefährdet dies unmittelbar die Ziele eines anderen [Müll07, S. 10]. Die Auswirkungen von Störungen erstrecken sich in Produktionsnetzwerken daher häufig über die gesamte Lieferkette [Gron19, S. 33]. Der vorangegangene Analyseabschnitt hat die Relevanz von Störungen und die Herausforderungen in Verbindung mit einer starken Hierarchisierung der Organisation zusätzlich hervorgehoben.

Es stellt sich die Frage, inwieweit das Auftreten von Störungen durch die gezielte Bereitstellung relevanter Informationen verhindert werden kann (vgl. Stufe 2 in Abbildung 15) bzw. welche Arten von Störungen hiervon unberührt bleiben und daher schnell und gezielt kommuniziert und so in ihrer Auswirkung abgeschwächt werden müssen (Lösungsprinzip Stufe 3). Um eine möglichst differenzierte Auswahl von Lösungsprinzipien zu ermöglichen, ist es notwendig, diejenigen Stellhebel zu identifizieren, die zu einer Verbesserung der Störungssituation in abhängigen Arbeitsprozessen führen. Hierzu werden die Wirkzusammenhänge in einem prozessbezogenen Störungsmodell aufgezeigt und diskutiert (Abschnitt 4.2.1). Im Anschluss werden reale Störfälle analysiert und dem Wirkmodell gegenübergestellt (Abschnitt 4.2.2). Da sich der Einbezug Dritter als zentrales Werkzeug zur Entstörung herausgestellt hat, werden abschließend die Vorgänge der Kollaboration im gestörten Prozess näher beleuchtet (Abschnitt 4.2.3).

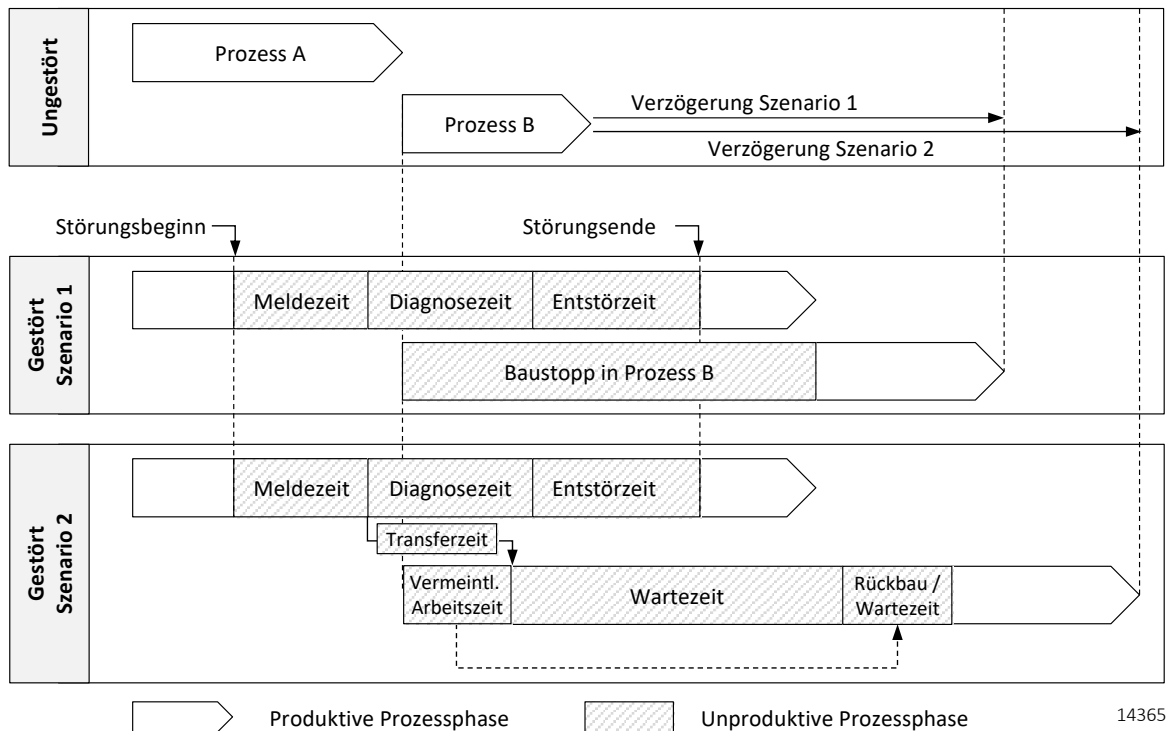
### 4.2.1 Störungswirkung in abhängigen Arbeitsprozessen

Im Allgemeinen teilt sich der für den Auftragsdurchlauf wirksame Teil eines Störungsverlaufs in Meldung, Diagnose und Entstörung auf [Heil95, S. 70ff.] (vgl. Abschnitt 2.2.2). Setzt man das von Heil entwickelte Modell beispielhaft in den Kontext zweier abhängiger Arbeitsprozesse und bedenkt dabei die zugrundeliegende hierarchische Struktur (vgl. Abbildung 16) und die daraus resultierenden Kommunikationsketten (vgl. Abbildung 17), so sind im Wesentlichen zwei Szenarien des gestörten Prozesses zu beobachten (vgl. Abbildung 18). In den Szenarien wird davon ausgegangen, dass zwei Prozesse (A und B) ohne Puffer sequenziell eingeplant wurden. Der Grund ist, dass sie im selben Bauraum stattfinden (ressourcenbedingte Abhängigkeit) oder technisch aufeinander aufbauen (prozessbedingte Abhängigkeit). Prozess A könnte beispielsweise eine Trockenbaumontage sein, der den Aufbau raumgebender Bauelemente zum Ziel hat und Prozess B ein anschließender Lackiervorgang für eben diese Bauelemente. Das Beispiel entspricht dem üblichen Planungsansatz der Unikatproduktion und wurde bei sämtlichen beteiligten Unternehmen beobachtet.

#### Szenario 1: Explizite Störung

Das erste Szenario geht davon aus, dass die aufgetretene Störung für den abhängigen Prozess offensichtlich ist. Ein geläufiges Beispiel ist die Überbelegung des Bauraums, die aus der Verzögerung in Prozess A resultiert und so den Beginn von Prozess B verhindert. Erarbeitet Prozess A für Prozess B notwendige Vorarbeiten, so wären die nicht fertiggestellten Vorarbeiten selbst im Falle unabhängiger Schichten ein klares Indiz für das Vorliegen einer Störung und Prozess B würde mit der Bauausführung warten, so dass die Störung weder Nacharbeiten noch einen Rückbau verursacht. Als Folge

entsteht so lediglich eine unproduktive Wartezeit.



14365

Abbildung 18: Störungsauswirkung in abhängigen Arbeitsprozessen

### Szenario 2: Implizite Störung

Liegen in Prozess A hingegen nicht offensichtliche Störungen vor, so beginnt Prozess B zunächst mit der Arbeit und stoppt diese erst, nachdem die Störung und dessen Auswirkung durch die entsprechenden Stellen geprüft und zur operativen Ebene kommuniziert wurden. Im Idealfall erkennen Akteure des ersten Prozesses unmittelbar die Auswirkung der aufgetretenen Störung auf den abhängigen Prozess B und informieren den entsprechenden Entscheidungsträger, welcher die Information über die aus seiner Sicht fremdinduzierte Störung an die entsprechenden Vorarbeiter und Werker weiterleitet. Neben unproduktiver Wartezeit entstehen so jedoch Zusatzaufwände für Rückbau bzw. Nacharbeiten. Nach erfolgreicher Entstörung muss auch dieses Ereignis über die Kommunikationskette bis zur operativen Ebene von Prozess B kommuniziert werden. In einem Praxisbeispiel, das in ähnlicher Form gleich mehrfach während der Prozessbegleitungen beobachtet werden konnte, sollte einer Elektroinstallation (Prozess A) direkt der Deckeneinbau (Prozess B) folgen. Die Elektroinstallation konnte aufgrund fehlenden Materials nicht vollständig ausgeführt werden, dies wurde jedoch nicht an den Deckenbauer kommuniziert. Dieser hat die Decke wie geplant eingebaut, wodurch die Restarbeiten der Elektroinstallation nichtmehr ausgeführt werden konnten. Als Folge wurde die gesamte Decke zurückgebaut, die Restarbeiten ausgeführt und die Decke anschließend wieder eingebaut. Implizite Störungen dieser Art treten insbesondere dann auf, wenn die abhängigen Akteure in unterschiedlichen Schichten arbeiten, was die direkte Kommunikation erschwert.

Ist Akteuren die Tragweite einer Prozessstörung nicht bekannt, so lässt sich infolgedessen auch die Dringlichkeit einer anstehenden Entscheidung nur schwer erkennen und diese wird häufig ver-

schleppt [Wei12, S. 3], [Gron19, S 35]. Durch die gegenseitige Abhängigkeit ist zur Lösung der Konflikte eine schnelle Information und umfassende Kommunikation unausweichlich [Broc93, S. 5ff.]. Besitzen die Akteure kein (offensichtliches) Interesse, sich untereinander abzustimmen, so regt dies die Problemstellung bei konfliktträchtigen Abhängigkeiten zusätzlich an [Ring97 S. 8]. Dies macht sich in einer deutlichen Erhöhung der Transferzeit und einer damit verbundenen Vergrößerung der Probleme bemerkbar.

Die obigen Beispiele zeigen, dass sich Reduzierungen der Melde- und Transferzeiten positiv auf die Produktivität in beiden Arbeitsprozessen auswirken. Da sich die Prozessverkettungen in der Realität nicht auf zwei Akteure beschränken, sondern häufig mehr Parteien umfassen, ist zudem eine Hebelwirkung zu erwarten. Maßnahmen zur Reduzierung dieser Zeiten sind weitestgehend unabhängig vom Typ der Störung oder den Aktivitäten zur Entstörung. Die Herausforderung liegt vielmehr darin, **die richtigen (internen wie externen) Adressaten zu identifizieren, das Problem und die korrespondierende Lösung präzise und verständlich zu beschreiben und schnell zu kommunizieren**. Diagnose- und Entstörzeiten sind im Gegensatz dazu abhängig von der Art der Störung und bedürfen spezifischer Maßnahmen zur Verbesserung. Im Folgenden werden daher beispielhafte Störszenarien aus der Praxis analysiert, um so typische Hebel zur Verbesserung aufzuzeigen.

### 4.2.2 Störungen im Montageprozess

Aufgrund der außerordentlich hohen Relevanz von Störungen wurde ergänzend zu den zuvor ausgeführten, qualitativen Prozessbeobachtungen eine Detailanalyse zur Störungsentstehung durchgeführt.

#### Randbedingungen: Detailanalyse Störungsentstehung

Gegenstand der Analyse waren repräsentative Mitarbeiter des Innenausbaus. Es wurde die tägliche Arbeit zweier Werker des Innenausbaus über insgesamt fünf Tage begleitet. Während dieser Tage wurden sowohl qualitative als auch quantitative Prozessaufnahmen getätigt, wobei sich die quantitativen Aufnahmen auf drei Schichten beschränkten, da die anderen zwei Schichten der Vor- und Nachbereitung der Analyse vorbehalten waren. Die quantitative Analyse zielte darauf ab, die Zustandsarten sowie Zustandsdauern der Mitarbeiter zu erfassen, um so ein Tätigkeitsprofil abzuleiten. Aufgrund der Sorge, dass derartige Analysen für Leistungsmessungen verwendet werden könnten, wurde ein Zeitaufschrieb von Seiten des Betriebsrats untersagt. Aus diesem Grund wurde der konkrete Zeitaufwand eines Zustands nicht gemessen, sondern auf eine Skala von 1 (geringer Zeitaufwand) bis 5 (hoher Zeitaufwand) abgeschätzt. Bezieht man die Schätzwerte aller Zustände einer Schicht nun auf die zeitliche Länge der Schicht, lässt sich der Zeitaufwand einzelner Zustände abschätzen. Die erfassten Zustände stellen nur eine Momentaufnahme von drei Tagen eines über mehrere Jahre währenden Ausbauprozesses dar. Die Ergebnisse sind daher statistisch nicht ausreichend gesichert und können im Rahmen dieser Analyse lediglich als Indikator für mögliche Störungsaufkommen dienen. Um die Ergebnisse zu untermauern, wurden die Schätzwerte den begleiteten Mitarbeitern sowie Verantwortlichen aus indirekten Bereichen zur Validierung vorgelegt und von diesen bestätigt. Auch wurde von den Verantwortlichen bestätigt, dass zum Zeitpunkt der Analyse keine besonderen Umstände vorlagen, die zu einer Verfälschung der Ergebnisse geführt haben.

### Methodik

Die Erfassung von Mitarbeiterzuständen zur Untersuchung von Abläufen der Unikatproduktion hat sich mehrfach als geeignet erwiesen [Tiet13, S. 204, ff.]. Die Methode lehnt sich an die von Frühwald entwickelte Rüstablaufanalyse an [Früh90] und lässt sich leicht an die spezifischen Gegebenheiten des vorliegenden Prozesses anpassen. Ein Mitarbeiterzustand besteht zunächst aus einer Tätigkeit und einem Objekt [Tiet13, S. 191, ff.]. Um schon während der Beobachtung störende Zustände zu identifizieren, wurde zusätzlich erfasst, ob ein Zustand unmittelbar zur Wertschöpfung beiträgt oder nicht. Da eine Störung zumeist mehrere, nicht wertschöpfende Zustände umfasst, wurden Gruppen zusammenhängender, nicht wertschöpfender Zustände als Störungsfall definiert (vgl. Abbildung 19). Einem solchen Fall lässt sich wiederum leicht eine Kategorie zuordnen und zusätzlich fallbasiert die angewandte Entstöurmaßnahme dokumentieren. Die Dokumentation unterliegt der Geheimhaltung und wird daher nicht im Anhang aufgeführt.

	Tätigkeit	Objekt	Aktivitätsdauer	Aktivitätstyp	Störungskategorie	Entstöurmaßnahme	Falldauer
	Montieren	Werkstück	3 min	Wertschöpfend			
Fall 1	Warten	Bauleiter	15 min	Nicht-Wertschöpfend	Aufgaben-zuteilung	Entstörung durch Dritte (Ermessen)	17 min
	Sprechen	Bauleiter	2 min	Nicht-Wertschöpfend			
Fall 2	gehen	Lager	3 min	Nicht-Wertschöpfend	Material-versorgung	Eigenhändige Entstörung	5 min
	Transportieren	Werkstück	2 min	Nicht-Wertschöpfend			
	Montieren	Werkstück	10 min	Wertschöpfend			

14366

Abbildung 19: Störungsbezogenes Aktivitätsprotokoll

Als Entstöurmaßnahmen gelten jene Maßnahmen, die der Werker ergreift, um einen Störungsfall zu beheben. Durch vorbereitende Experteninterviews sowie einen eintägigen Probelauf der Methodik wurden die möglichen Maßnahmen auf die im Folgenden beispielhaft erläuterten drei reduziert:

- **Eigenhändige Entstörung:** Die Entstörung erfolgt einzig durch den Werker selbst, ohne dass Dritte (Bauleiter / Ingenieure / andere Werker) involviert sind.  
Beispiel: Ein Material wird gesucht, da der Lagerort nicht bekannt ist.
- **Entstörung durch Dritte (Information):** Die Entstörung erfolgt unter Beteiligung Dritter, wobei diese lediglich erweiterte Informationen zur Verfügung stellen.  
Beispiel: Der Lagerort wird beim Materialdisponenten erfragt, der die Information im Materialwirtschaftssystem abrufen und weitergibt.
- **Entstörung durch Dritte (Ermessen):** Die Entstörung erfolgt unter Beteiligung Dritter, wobei diese Ermessensentscheidungen treffen müssen, um das Problem zu lösen.  
Beispiel: Es liegt eine Beschädigung am Bauteil vor und es muss vom Bauleiter entschieden werden, ob dieses ausgetauscht werden muss.

Abbildung 19 zeigt einen exemplarischen Ausschnitt des Protokolls: Nachdem die Montage eines Werkstücks abgeschlossen war, wurde zur Klärung der neuen Arbeitsaufgabe zunächst auf den zuständigen Bauleiter gewartet und anschließend die neue Aufgabe besprochen (Fall 1). Im Anschluss wurde nach einem Laufweg das neue Material transportiert, um mit der Montage des neuen Werkstückes fortzufahren (Fall 2).

Abbildung 20 zeigt die Auswertung der dokumentierten Störungsfälle im Überblick. Hierbei ist anzumerken, dass die Grundgesamtheit der Mitarbeiterzustände um Anteile persönlicher Verteilzeit bereinigt wurde, da diese nicht dem Arbeitsprozess zuzuordnen sind. Nicht wertschöpfende Aktivitäten nahmen einen Zeitanteil von 60% des Betrachtungszeitraumes ein. Im Folgenden werden die sechs Störungskategorien in absteigender Reihenfolge ihrer Zeitanteile anhand von Beispielen erläutert und die daraus resultierenden Anforderungen für die Lösungsfindung abgeleitet.

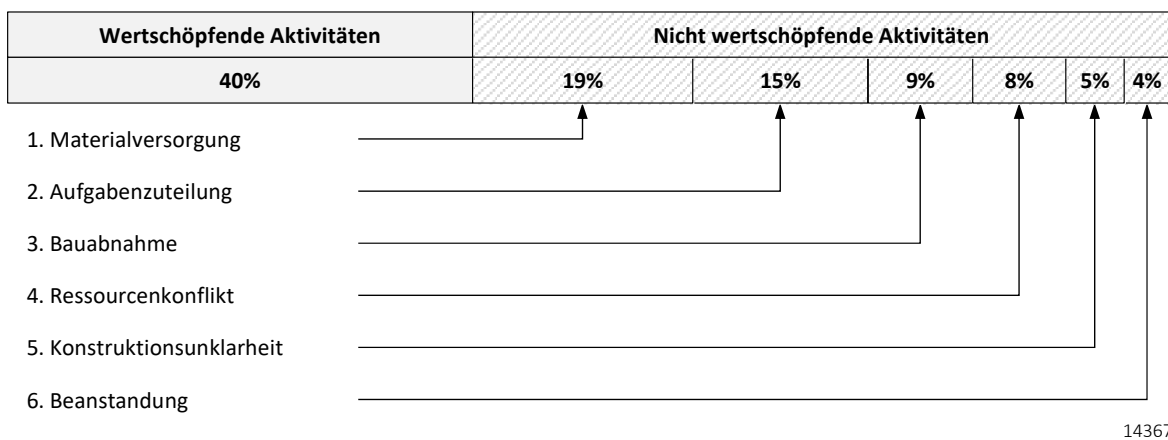


Abbildung 20: Störungskategorien im Überblick

### 1. Materialversorgung (19% Zeitanteil)

Störungen aufgrund einer unzureichenden Materialversorgung stellen die größte Gruppe auftretender Störungsfälle dar. Beispiele für Fälle dieser Kategorie sind spontan benötigte Verbrauchsmaterialien oder Werkzeuge, die aus Kleinteillägern bzw. Shops beschafft werden. Besonders auffällig an diesen Fällen ist nicht nur die Gesamtsumme der Störungsdauer, sondern auch die Häufigkeit und Frequenz, mit der sie eintreten. Abbildung 21 zeigt beispielhaft die kumulierte Störungsdauer über den Verlauf einer Schicht.

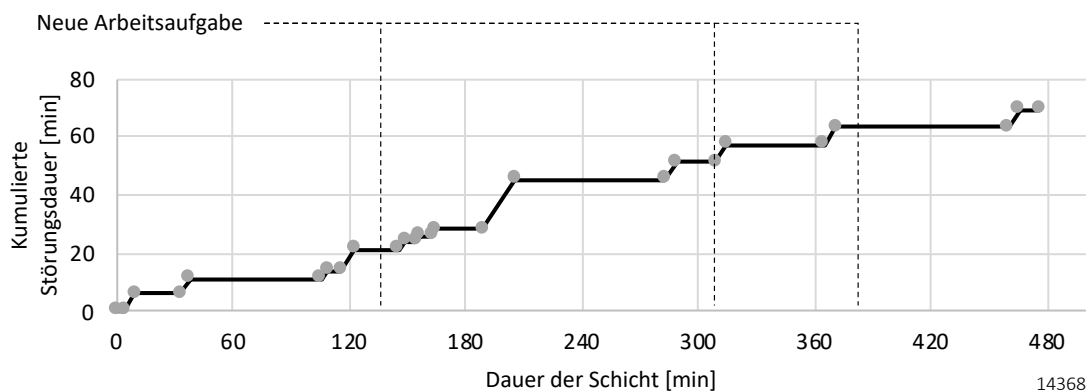


Abbildung 21: Kumulierte Störungsdauer (Materialversorgung) während einer Schicht

Im Mittel trat in der betrachteten Schicht alle 30 Minuten eine Störung in der Materialversorgung auf, wobei lediglich in zwei Fällen (nach Zuteilung einer neuen Arbeitsaufgabe) eine sinnvolle Begründung des Auftretts vorlag. Betrachtet man ergänzend die Tätigkeitsverteilung während der Störungswirkung (vgl. Abbildung 22), so fällt der überwiegende Anteil (ca. 60%) der Aktivitäten auf das Bewältigen von Lauf- und Transportwegen zurück. Da die Materialien aus einer begrenzten Anzahl von Quellen bezogen werden, könnte eine Zusammenfassung der Beschaffungstätigkeiten doppelte Lauf- und Transportwege vermeiden und so zu einer Verbesserung der Produktivität führen.

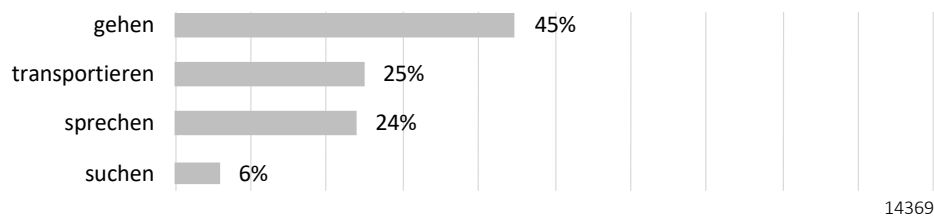


Abbildung 22: Tätigkeitsverteilung in der Störungskategorie Materialversorgung

Weiterhin ist nachgewiesen, dass häufige Arbeitsunterbrechungen zu einem ständigen Aufgabenwechsel und somit zu fragmentierter Arbeit führen [Freu10, S. 14]. Nach jeder Unterbrechung entstehen kognitive Aufwände zur Wiederaufnahme der Tätigkeit, die in der Regel auch Verzögerungen zur Folge haben [Mark05, S. 8], [Freu10, S. 14]. Es ist daher zu erwarten, dass Maßnahmen zur Zusammenfassung der Tätigkeiten eine Hebelwirkung haben.

### 2. Aufgabenzuteilung (15% Zeitanteil)

Die Abläufe in der Montage werden von entsprechenden Montageaufträgen gesteuert. Diese werden nach Freigabe durch die Fertigungsvorbereitung von den Vorarbeitern der Gewerke verwaltet und bei Bedarf einzelnen Werkern oder Werkergruppen zugeordnet. Die Bewertung der Materialverfügbarkeit, die Bewertung der individuellen Qualifikation und die eigentliche Zuordnung erfolgen hierbei händisch und papierbasiert. Als Folge entstehen lange Unterbrechungen des Arbeitsablaufs des Werkers nach jeder Auftragsfertigstellung. Mehr als die Hälfte der Unterbrechung besteht für den Werker aus vermeidbarer Wartezeit (vgl. Abbildung 23).

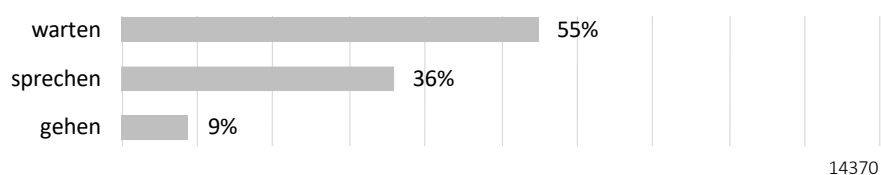


Abbildung 23: Tätigkeitsverteilung in der Störungskategorie Aufgabenzuteilung

Der defizitäre Ablauf der Aufgabenzuteilung ist Folge einer unzureichenden Transparenz der vor- und nachgelagerten Arbeitsprozesse. Sowohl die Verfügbarkeit von Materialien als auch des Arbeitsraumes unterliegt einer hohen Unsicherheit und es kann nur wenige Stunden im Voraus geplant werden. Durch häufige Baustopps und dadurch notwendige Neuzuteilungen von Aufgaben wäre daher ein hoher Bestand geplanter Montagetätigkeiten unwirtschaftlich. Die Abläufe ließen sich zwar verbessern, jedoch sind sie zum Großteil den Eigenarten der Unikatproduktion geschuldet und nur bedingt optimierbar. Alternativ könnte jedoch eine transparentere Gestaltung des eigenen

Montageprozesses dafür sorgen, dass die Auftragsvorbereitung durch den Bauleiter bereits frühzeitig begonnen und so Wartezeiten für die Werker vermieden werden könnten.

### 3. Bauabnahme (9% Zeitanteil)

Nach der Fertigstellung einer (Teil-) Arbeitsaufgabe überprüft der Vorarbeiter bzw. Bauleiter das Arbeitsergebnis. Die Maßnahme der (informellen) Bauabnahme ist insbesondere in der Unikatproduktion häufig zu beobachten, da ein Teil der Materialien mit Übermaßen auf die Baustelle geliefert und erst vor Ort final angepasst wird. Einbaufehler erfordern somit häufig Neuanfertigungen und führen zu Kosten und Verzögerungen. Werker sind angehalten, Montagen oder geplante Montagen frühzeitig mit den Bauleitern zu diskutieren und informell abnehmen zu lassen. Die Entstörung geschieht daher im Regelfall durch Ermessensentscheidungen des Bauleiters direkt vor Ort. Betrachtet man wiederum die Tätigkeitsverteilung während der Störungsfälle, so schlägt sich der Ablauf in hohen Zeitanteilen für das gemeinschaftliche Prüfen des Werkstückes sowie zur gemeinsamen Diskussion (sprechen) nieder (vgl. Abbildung 24).

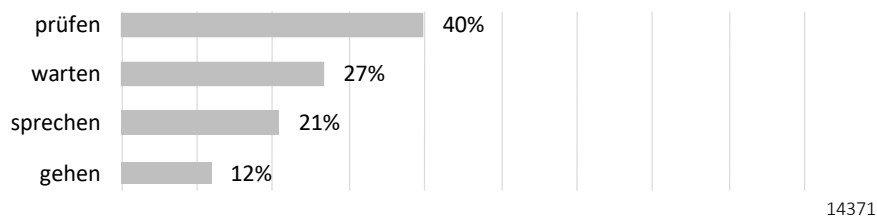


Abbildung 24: Tätigkeitsverteilung in der Störungskategorie Bauabnahme

Zu ca. 40% wird die Störungsdauer jedoch von Wartezeiten und Zeiten für Laufwege (gehen) beeinflusst. Wiederum erweist sich der Bauleiter als Engpass. Um die Wirkung dieser Abhängigkeit abzumildern, sind Werkzeuge notwendig, die es ermöglichen, einen Bauleiter schnell zu kontaktieren und mit ihm (idealerweise aus der Ferne) über fachliche Fragestellungen diskutieren zu können (vgl. Stufe 4 in Abbildung 15). Weiterhin würde eine transparentere Verfolgung des Montagefortschritts eine Vorausplanung und Gruppierung von Abnahmeprozessen ermöglichen.

### 4. Ressourcenkonflikt (8% Zeitanteil)

Durch die Beteiligung vieler (dezentral und autark geplanter) Gewerke und den begrenzten Bauraum auf der Baustelle kommt es häufig zu Unstimmigkeiten und kurzfristigen Baustopps. Aufgrund des Aufwands, der mit einem Wechsel der Arbeitsaufgabe verbunden ist (Aufgabenzuteilung, Materialversorgung), wird in der Regel davon abgesehen. Stattdessen warten die Werker, bis der Bauraum verfügbar ist. Dieser Ansatz ist zwar nachvollziehbar und im Einzelfall sinnvoll, die Baustopps sind häufig jedoch sowohl den Abläufen zur Aufgabenzuteilung als auch der Intransparenz (horizontal) paralleler Arbeitsprozesse geschuldet. Erschwerend kommt hinzu, dass unterschiedliche Gewerke unterschiedliche Bezeichnungen und Definitionen für Räume und Bauraumzonen verwenden. Dies erschwert die Planung und die Abstimmung insbesondere bei Störungsfällen und führt zu Missverständnissen. Zur Lösung der Problematik wird eine einheitliche Terminologie benötigt. Zusätzlich müssen jedoch auch Mechanismen geschaffen werden, diese effizient einzusetzen, z. B. um aktuelle und geplante Ressourcenbelegungen sichtbar zu machen. Die Beobachtung unterstreicht die Relevanz einer **schnellen und gezielten Kommunikation der Störung**, die zur Überbelegung des Bauraums

führte: Diese hätte es ermöglicht, von vornherein eine alternative Aufgabe auszuwählen, um Wartezeiten zu vermeiden.

### 5. Konstruktionsunklarheit (5% Zeitanteil)

Halata hat in seiner Arbeit die produktivitätswirksamen Folgen einer unzureichenden Versorgung von Werkern der Sektionsfertigung mit konstruktionsbezogenen Informationen wie Bemaßungen, Einbaulagen und Richtlinien belegt [Hala18, S. 141, ff.]. Auch im Innenausbau führen missverständliche Zeichnungen oder fehlende Informationen häufig zu Rückfragen der Werker. Problematisch hieran ist, dass die Rückfragen zumeist an den Bauleiter gestellt werden, dieser jedoch nicht über eine ausreichende Informationsgrundlage verfügt, um direkt eine Antwort zu geben. Die Rückfragen werden daher in der Regel an den verantwortlichen Ingenieur weitergeleitet und rufen weitere Produktivitätsverluste (z. B. durch Wartezeiten) hervor. Da die Ingenieure in der Regel nicht unmittelbar in der Nähe der Baustelle arbeiten, erfolgt die Diskussion zumeist telefonisch und wird durch den Austausch von Fotos ergänzt. Der Prozess gestaltet sich insbesondere durch den Kommunikationsfluss über den Bauleiter als langwierig und fehleranfällig. Eine direkte Kommunikation zwischen Ingenieuren und Workern (vgl. Stufe 4 in Abbildung 15) setzt jedoch voraus, dass die Anliegen gefiltert und zielgerichtet zum richtigen Adressaten gelangen (vgl. Stufe 3 in Abbildung 15) und zudem möglichst mit sämtlichen notwendigen Informationen (Position der Problematik, betroffene Sachnummer, ergänzende Fotos) angereichert werden. Ein Teil der Störungsfälle hätte zudem durch eine gezielte Bereitstellung aller für den Montageprozess relevanten Informationen vermieden werden können.

### 6. Beanstandung (4% Zeitanteil)

Beanstandungen nehmen zwar den kleinsten Anteil des Beobachtungszeitraums ein, haben jedoch abseits der beanspruchten Zeitanteile einen hohen Stellenwert: Aus Sicht des Montageprozesses führt die Beanstandung eines beschädigten Bauteils in der Regel zu einem lokalen Baustopp und einer Aufgabenneuzuteilung. In indirekten Bereichen wie dem Qualitätsmanagement verursacht die Beanstandung jedoch Aufwände, um die Verantwortlichkeit zu klären und vor allem den Qualitätsmangel zu beheben. Da die Aufwände zu Verzögerungen führen, sind Beanstandungen möglichst schnell und präzise zu kommunizieren. Dies ermöglicht es zudem parallel arbeitenden Gewerken zu bewerten, ob und wie stark der eigene Montageprozess von der Beanstandung betroffen ist.

### Entstörmaßnahmen

Es fällt auf, dass in ca. 80% der nicht wertschöpfenden Zeitanteile eine zusätzliche Person (in der Regel der Vorarbeiter oder Bauleiter) an der Entstörung beteiligt ist (vgl. Abbildung 25).

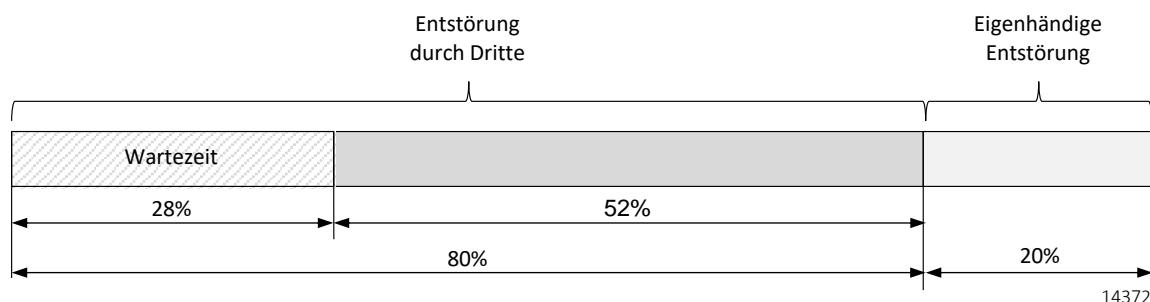


Abbildung 25: Aufteilung nicht wertschöpfender Zeitanteile zur Entstörung

Zudem ruft die Beteiligung Dritter an der Entstörung in hohem Maße Wartezeiten hervor (ca. 28% der gesamten nicht wertschöpfenden Aktivitäten) und führt somit zu vermeidbaren Produktivitätsverlusten. Um die Ursachen hierfür zu untersuchen und Lösungsmöglichkeiten zu diskutieren, befasst sich der zweite Analyseabschnitt mit den Vorgängen auf Seiten der Bauleiter.

### 4.2.3 Kollaboration im gestörten Prozess

Die Klärung von Problemen ist elementarer Bestandteil des Aufgabenspektrums eines Bauleiters bzw. Vorarbeiters. Dieser Abschnitt schließt an den vorigen an und führt die Prozessanalyse der Entstörung insbesondere im kollaborativen Kontext (durch Beteiligung Dritter) weiter aus.

#### Randbedingungen: Detailanalyse Entstörung

Im Rahmen dieses Analyseschrittes wurde ein Bauleiter über zwei Schichten durch den Autor selbst begleitet und die auftretenden Störfälle in Form einer Zeitaufschreibung protokolliert. Die Daten wurden in Zusammenarbeit mit einem Unternehmen erhoben, das sich durch eine besonders hohe Heterogenität der beteiligten Gewerke, eine besonders starke Hierarchisierung sowie einen sehr weitläufigen Bauraum auszeichnete. Zwar gleichen sich die Montageprozesse in hohem Maße, aufgrund des veränderten Betrachtungsraumes gegenüber dem vorigen Abschnitt sind Querverweise zwischen den beiden Erhebungen allerdings nicht zulässig. Aufgrund des geringen Stichprobenumfangs sind die erhobenen Daten zudem nicht statistisch verwertbar und stellen somit nur ein Beispiel für eine mögliche Verteilung dar.

#### Methodik

Während der Schichtbegleitung des Bauleiters wurden sämtliche Mitarbeiterzustände protokolliert, die unmittelbar der Entstörung eines Problems dienten. Es wurde Start- und Endzeitpunkt der Entstörung sowie der grobe Inhalt des Problems und die Art der Entstörung protokolliert. Retrospektiv wurde dann für jeden Fall ergänzt, ob die Entstörung vor Ort oder aus der Ferne stattgefunden hat und ob die Entstörung synchron oder asynchron erfolgt ist.

#### Ergebnisse

Abbildung 26 zeigt die kumulierte Klärungsdauer einer Schicht. Während dieser hat der begleitete Bauleiter an der Entstörung von 43 Fällen mitgewirkt. Die Fälle wurden in der Regel kurzfristig und in Form von E-Mails oder Textnachrichten, telefonisch oder persönlich an den Bauleiter herangetragen. Die einzelnen Fälle wurden unmittelbar nacheinander abgearbeitet, sodass lediglich zu vier Zeitpunkten Unterbrechungen von mehr als zehn Minuten entstanden, die wiederum auf persönliche Verteilzeiten oder vereinbarte Treffen in anderen Belangen zurückzuführen waren. Der Entstörungsbedarf des Montageprozesses war so hoch, dass die Fälle priorisiert werden mussten und auf Seiten der Werker hohe Wartezeiten auftraten. Auch war zu beobachten, dass sich das Aufgabenspektrum des Bauleiters notwendigerweise auf die Entstörung reduzierte. Wichtige Tätigkeiten, wie die Überwachung und Verbesserung des Produktionsablaufs, geraten dadurch in den Hintergrund.

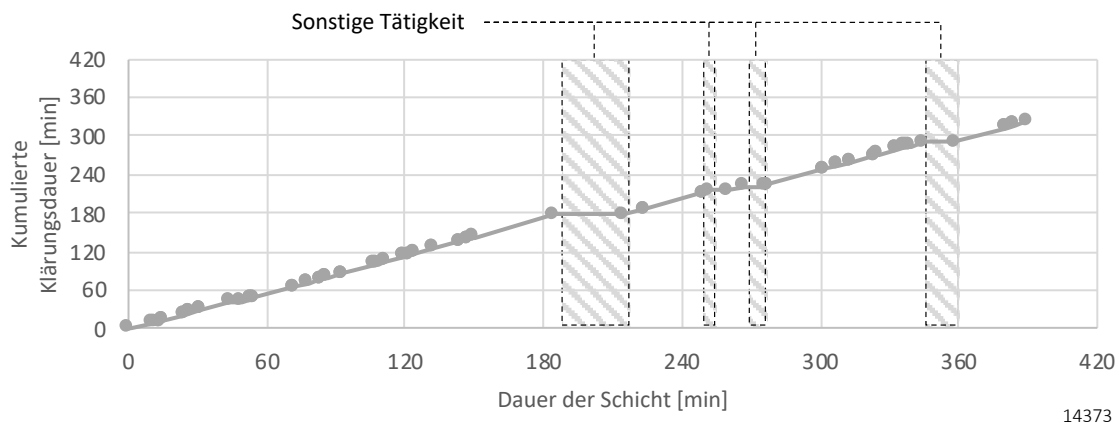


Abbildung 26: Kumulierte Klärungsdauer eines Bauleiters während einer Schicht, nach [Jahn22, S. 3]

Ein Treiber für Produktivitätsverluste im Montageprozess sind die unzureichenden Kommunikationswege zwischen Bauleiter und Werker. Kommt es zu einem dringenden Klärungsbedarf, so versucht der Werker den Bauleiter in der Regel telefonisch zu kontaktieren. Schlägt der Versuch fehl, bleibt dem Werker nur die Möglichkeit, den Bauleiter persönlich aufzusuchen und das Anliegen vorzubringen oder ihm in weniger dringenden Fällen eine E-Mail oder Textnachricht zu senden. Die persönliche Kontaktaufnahme ist mit Laufwegen und Suchzeiten zum Antreffen des Ansprechpartners verbunden und kann auftretende Wartezeiten ebenfalls nicht vermeiden. Die fehlende Struktur und häufig nur kurze und damit unzureichende Beschreibungen der Störungsfälle erschweren es dem Bauleiter zudem, Störungen gewissenhaft zu priorisieren.

Weil der Bauleiter Kapazitätsengpass der Entstörung ist, entstehen für die Werker Wartezeiten. Der Aufbau zusätzlicher Bauleiter-Kapazität wäre eine logische Konsequenz der aufgedeckten Defizite und würde unmittelbar Abhilfe für den Montageprozess schaffen. Aus wirtschaftlicher Sicht stellt sich jedoch zunächst die Frage nach einer für den Bauleiter effizienteren Gestaltung der Prozessabläufe. Die Analyse hat ergeben, dass die Entstörungen in ca. sechs von zehn Fällen sofort und direkt am Ort des Geschehens erfolgt (Abbildung 27). Dies führt zu einer Verschlechterung der Erreichbarkeit des Bauleiters und zu einem Anstieg von Wartezeiten für die Werker.

<b>Zeitpunkt der Entstörung</b>	zeitversetzt (22%)	5%	17%
	sofort (78%)	59%	19%
		<b>vor Ort (64%)</b>	<b>aus der Ferne (36%)</b>
<b>Entstörungsort</b>			

14374

Abbildung 27: Zeit- und Ortsbezug während der Entstörung

Insbesondere die örtliche Abhängigkeit während des Entstörprozesses kann auf die geringe Informationsqualität für übermittelte Störungen zurückgeführt werden. Reicht diese nicht aus, um eine Entscheidung aus der Ferne zu treffen, bedarf es einer Begehung vor Ort.

Die Entstörung selbst erfolgt in 45% aller Fälle durch Informationsbeiträge. Bezogen auf die Klärung durch Dritte (in der Regel Bauleiter) beträgt dieser Anteil sogar 56% (vgl. Abbildung 28). Gelingt es, die zur Entstörung erforderlichen Informationen den Werkern direkt bereitzustellen, könnten die Bauleiter also erheblich entlastet werden.

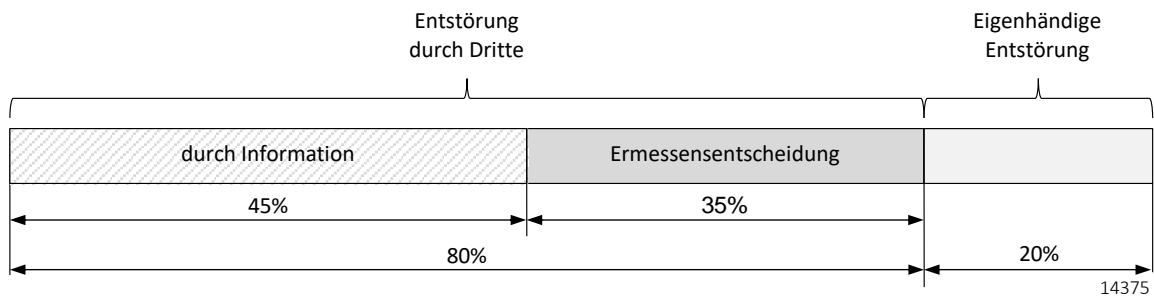


Abbildung 28: Anteil informatorischer Tätigkeiten bei der Entstörung durch Dritte

Ermessensentscheidungen haben einen Anteil von 35% der Entstörungen. Sie rechtfertigen in der Regel eine Konsultation des Bauleiters, da davon ausgegangen werden muss, dass der Werker nicht über die notwendige Erfahrung oder Qualifikation verfügt, um die Entscheidung eigenmächtig zu treffen.

Zusammenfassend ergeben sich die folgenden Schlussfolgerungen:

1. Die Konsultation Dritter ist gegenwärtig das primäre Werkzeug (>80%) zur Lösung von Störungen im Montageprozess.
2. Die Störungen werden in der Regel unstrukturiert und über unterschiedliche Kanäle kommuniziert.
3. Der Bauleiter ist gegenwärtig Kapazitätsengpass bei der Entstörung.
4. Der Bauleiter muss die Störungsfälle in kurzer Zeit, auf Grundlage weniger und unstrukturierter Informationen und häufig aus der Ferne priorisieren.
5. Es treten hohe Wartezeiten auf, wobei diese durch die allgemein schlechte Erreichbarkeit des Bauleiters sowie durch zeitliche und örtliche Abhängigkeiten während der Entstörung noch verstärkt werden.
6. Die reine Weitergabe von Informationen überwiegt inhaltlich der Übermittlung von Ermessensentscheidungen.

Zunächst stellt sich die Frage, inwiefern eine Optimierung der Informationsversorgung des Werkers einfachere Wege der Entstörung, ohne die Beteiligung Dritter, zulässt oder das Auftreten von Störungen sogar ganz vermeiden kann. Hierzu bedarf es jedoch der im nachfolgenden, dritten Analyseabschnitt durchgeführten, detaillierteren Betrachtung der Informationsversorgung. Weiterhin bedarf es einer Verbesserung der Kommunikationsprozesse, sodass Warte-, Geh- und Suchzeiten bei der Konsultation der erforderlichen Ansprechpartner reduziert werden. Bauleiter agieren gegenwärtig vor allem reaktiv, nachdem Störungen bereits aufgetreten sind. Die Vermeidung von Störungen durch vorbeugende Maßnahmen kann aufgrund des Zeitdrucks bei der Entstörung kaum stattfinden.

Auch leidet die Qualität von Entscheidungen durch Bauleiter stark unter dem Zeitdruck und der mangelhaften Informationsqualität. Eine Priorisierung der auftretenden Störungen findet aus demselben Grund ebenfalls kaum statt. Es stellt sich somit ergänzend die Frage, wie der Meldevorgang inhaltlich zu gestalten ist, damit dem Entscheidungsträger alle notwendigen Informationen vorliegen und eine fundierte Priorisierung und Entscheidungsfindung möglich wird, ohne beim Meldenden höhere Aufwände zu verursachen.

### 4.3 Informationsversorgung

Eine wichtige Herausforderung in der Unikatproduktion ist es, den hohen Informationsbedarf in der Fertigung zu decken, hierbei jedoch den Aufwand zur Erzeugung der Informationen gering zu halten, der bei jedem Produkt erneut anfällt. Es besteht ein Zielkonflikt, in dem ein Ungleichgewicht entweder zu hohen Aufwänden zur Informationserzeugung in den indirekten Bereichen oder zu einer informatorischen Unterversorgung der Produktion führt. Halata konnte den spezifischen Informationsbedarf beispielhafter Produktionsszenarien in umfangreichen Analysen erfassen [Hala18, S. 34] sowie die Folgen der Unterversorgung für den Produktionsprozess aufzeigen [Hala18, S. 29]. Insbesondere die von Halata als Fehlprozess (mit Auswirkungen auf Lohn- und Materialkosten sowie die Durchführungszeit) betitelte Folge einer unzulänglichen Information, die während bzw. nach der Montage bemerkt wird, konnte auch in dieser Analyse ausdrücklich bestätigt werden. Im Folgenden wird zunächst der Informationsbedarf eines beispielhaften Prozesses im Innenausbau analysiert (Abschnitt 4.3.1) und den verfügbaren Informationsquellen gegenübergestellt (Abschnitt 4.3.2). Zuletzt werden anhand dieser Betrachtungen Maßnahmen zur Verbesserung der Informationsversorgung formuliert (Abschnitt 4.3.3).

#### 4.3.1 Informationsbedarfe

Die benötigten Informationen hängen stark vom Betrachtungsbereich ab (vgl. [Hala18, S. 34-35], Sektionsausrüstung versus Schaltschrankmontage). Um die Ursache für Störungsfälle zu analysieren, die durch mangelhafte Informationen entstanden sind, ist weniger die Störung selbst bedeutsam als die anschließenden Vorgänge zur Informationsbeschaffung durch den Werker. Hierzu wurde ein Mitarbeiter mit mehrjähriger Erfahrung im Innenausbau zu den von ihm benötigten Informationen und den jeweiligen Bezugsquellen befragt. In einem Workshop wurden Kombinationen aus Informationsbedarfen und jeweils mehreren alternativen Bezugsquellen gebildet und hinsichtlich der in Abbildung 29 dargestellten Kriterien bewertet.

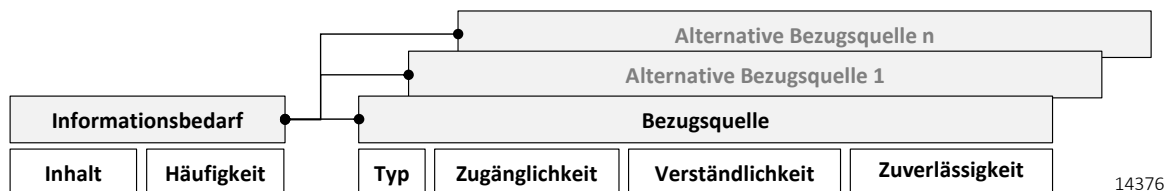


Abbildung 29: Modell zur Analyse der Informationsversorgung

Hierbei kennzeichnet die Zugänglichkeit den physischen Beschaffungsaufwand und die Verständlichkeit den notwendigen Aufwand zur Interpretation der Information. Die Zuverlässigkeit schätzt ab, in wie viel Prozent der Fälle die einer Quelle entnommene Information korrekt bzw. im Falle älterer

Informationen noch gültig ist. Der Typ der Bezugsquelle gibt an, ob es sich um ein Dokument, ein IT-System oder eine Person handelt. Der Informationsbedarf wird durch den Inhalt (z. B. Lagerort) und die Häufigkeit des Bedarfs klassifiziert.

Abbildung 30 stellt den Informationsbedarf den Bezugsquellen gegenüber. Den Werkern wird von der Arbeitsvorbereitung wöchentlich je Montageauftrag eine Sammlung relevanter Dokumente (Zeichnungen, Zuschnittlisten, Stücklisten etc.) bereitgestellt. An zentralen Orten stehen Rechner-terminals mit Intranetzugang für ausgewählte Anwendungen bereit (Lagerlisten, Normen, sonstige digitale Dokumente). Darüber hinaus sind Ansprechpartner für technische und organisatorische Be-lange telefonisch, persönlich oder per E-Mail kontaktierbar.

	Information	Bezugsquelle		
		Dokument	IT-System	Person
<b>mehrmals täglich</b>	Montagerichtlinien	✓	✓	✓
	Maße / Einbauposition	✓	fehlender Zugang	✓
	Schnittansichten	✓	fehlender Zugang	✓
<b>einmal täglich</b>	Baufortschritt	✓	nicht vorhanden	nicht vorhanden
	Lagerorte	nicht vorhanden	✓	✓
	Liefertermine	nicht vorhanden	fehlender Zugang	✓

✓ vorhanden

14377

Abbildung 30: Informationsbedarfe und Bezugsquellen

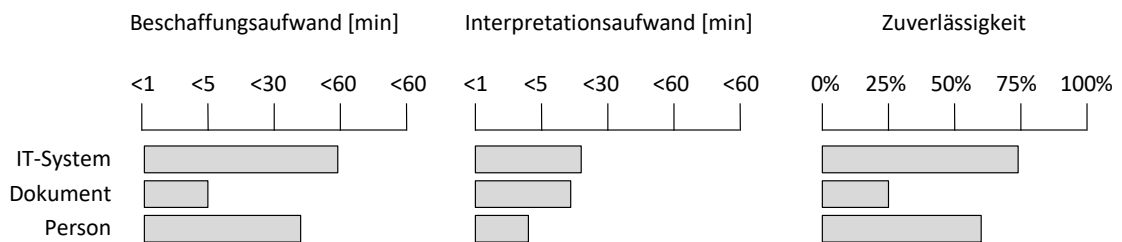
Mehrmals täglich benötigte Informationen können vollständig den bereitgestellten Dokumenten entnommen sowie von Personen erfragt werden. Für Konstruktionsdaten (Maße, Einbaupositionen, Schnittansichten) fehlen die notwendigen Zugangsberechtigungen zu den IT-Systemen.

Informationen zur Materiallogistik (Lagerorte, Liefertermine) hingegen sind schwer zugänglich, da sie aufgrund häufiger Änderungen nicht in statischen Dokumenten bereitgestellt werden können. Baufortschritte werden handschriftlich auf Tafeln am Verbauort dokumentiert und nur unregelmäßig und konsolidiert in ein IT-System überführt.

Für die vollständige Deckung des Informationsbedarfs muss auf alle Bezugsquellen zurückgegriffen werden. Hierbei erscheinen insbesondere fehlende Zugänge ein einfach lösbares Problem zu sein. Dies könnte jedoch im Falle komplexerer IT-Systeme zusätzliche Schulungsaufwände bedeuten. Im Falle mehrerer möglicher Quellen stellt sich die Frage nach der Herangehensweise des Werkers zur Quellenauswahl. Auch bleibt offen, wie alternative Quellen aus wirtschaftlicher Sicht zu differenzieren sind. Im Folgenden werden daher die Quellen auf Grundlage der zuvor erläuterten Bewertungssystematik untersucht und einander gegenübergestellt.

### 4.3.2 Bewertung der Informationsquellen

Abbildung 31 stellt die Bewertung der Bezugsquellen hinsichtlich des Beschaffungs- und Interpretationsaufwands sowie der Zuverlässigkeit dar. Der Experte bewertete die Aufwände auf einer nicht linearen Skala mit den Werten: <1 Minute, <5 Minuten, <30 Minuten, <60 Minuten sowie >60 Minuten. Die Einteilung wurde zuvor gemeinsam mit dem Experten erarbeitet. Die Zuverlässigkeit bezeichnet den geschätzten Anteil der Informationszugriffe, bei denen sich die Information im Nachhinein als korrekt erwiesen hat. Liegt die Zuverlässigkeit bei 75%, so kann demzufolge davon ausgegangen werden, dass eine von vier Informationen aus dieser Quelle veraltet oder nicht korrekt ist.



14378

Abbildung 31: Bewertung der Informationsquellen

#### Beschaffungs- und Interpretationsaufwand

Der Aufwand zur Beschaffung und Interpretation ist eine wichtige Größe für den Werker. Fertigungsunterlagen liegen unmittelbar am Verbauort vor und sind somit physisch sehr einfach zugänglich, enthalten aber eventuell nicht alle erforderlichen Informationen oder stellen diese nur implizit zur Verfügung. Um die Erstellungsaufwände gering zu halten, handelt es sich bei den bereitgestellten Dokumenten zumeist um Übersichtszeichnungen und umfassende Listen. Die Werker müssen die benötigten Maße aufwändig per Hand aus den Zeichnungen messen (sofern dies überhaupt möglich ist) und Listen händisch sortieren bzw. filtern. Es entsteht somit ein zusätzlicher Interpretationsaufwand. IT-Systeme sind nur an zentralen Orten verfügbar und werden von mehreren Werkern gleichzeitig genutzt, sodass der physische Aufwand zur Nutzung dieser Systeme hoch ist und häufig Wartezeiten entstehen. Auch werden die Informationen nicht für den Anwendungsfall aufbereitet und müssen vom Werker interpretiert werden. Personen als Informationsquelle sind in der Lage, die benötigten Informationen zu filtern und konkret für die vorliegende Problemstellung aufbereitet zur Verfügung zu stellen, sodass ein geringer Interpretationsaufwand gewährleistet werden kann. Jedoch stellen auch Personen eine geteilte Ressource mit geringer Verfügbarkeit dar, sodass die Erreichbarkeit bzw. der Beschaffungsaufwand nicht optimal sind.

Die Bewertung zeigt, dass die IT-Systeme in ihrer derzeitigen Form als stationäre Terminals aus Aufwandssicht die ungünstigste Quelle für Informationen darstellen. Personen sind im Falle spezieller Informationen zu bevorzugen, Dokumente stellen jedoch nach wie vor das geeignetste Mittel für den Bezug von Informationen dar.

#### Zuverlässigkeit

Dokumente werden in der Regel gezielt erzeugt und teilweise ausgedruckt. Mit voranschreitender Zeit besteht daher das Risiko, dass die dargestellten Informationen veralten. Im Falle des Beispielprozesses werden Dokumente wöchentlich aktualisiert. Dies ist den Werkern bewusst, sodass die

Unterlagen zwar verwendet, jedoch berechtigterweise häufig hinterfragt werden. Der Bezug einer Information direkt aus dem Quell-(IT-)System hingegen unterliegt diesem Problem nicht. Auch Informationen, die unmittelbar von den dafür zuständigen Personen bezogen werden, wird in hohem Maße vertraut.

Es zeigt sich, dass Dokumente aus Aufwandssicht zwar priorisiert werden, jedoch nicht zuverlässig sind. Aufgrund der mangelhaften Verständlichkeit von IT-Systemen stellen Personen die erste Wahl zur Absicherung dar. Dies bestätigt die in den vorangegangenen Analyseabschnitten identifizierten hohen Aufwände zur Entstörung durch Dritte, die vornehmlich Informationen weitergeben. Neben den bereits genannten Nachteilen stellt diese Tatsache auch aus wirtschaftlicher Sicht ein Problem dar, wie im Folgenden dargelegt wird.

### **Bereitstellungsaufwand**

Die bisher genannten Größen sind insbesondere für den Werker als Empfänger der Information relevant. Je nach Quelle steht einer Information jedoch ein gewisser Aufwand zur Bereitstellung gegenüber. Diesen Aufwand gilt es (insbesondere in der Unikatproduktion) zu minimieren. Die Daten eines IT-Systems müssen gepflegt werden, ein Dokument muss erstellt, gedruckt und bereitgestellt werden und eine Person wird bei Zwischenfragen in ihrem Arbeitsfluss unterbrochen. Der jeweilige Aufwand unterliegt unterschiedlichen Faktoren und ließe sich nur im Einzelfall beziffern. Eine grundsätzliche Reihenfolge in der Aufwandsgestaltung ist jedoch offensichtlich: Durch stationäre IT-Systeme bereitgestellte Informationen können automatisch von einer beliebigen Anzahl von Mitarbeitern genutzt werden und stellen damit die aufwandsärmste Alternative dar. Dokumente müssen zwar individuell gedruckt und bereitgestellt werden, dies kann jedoch durch Automatismen unterstützt werden und für mehrere Mitarbeiter gleichzeitig erfolgen. Die Informationsbereitstellung durch Personen erfolgt in der Regel bilateral. Wird dieselbe Information mehrfach benötigt, fällt so auch der Bereitstellungsaufwand mehrfach an. Diese Art der Quelle verursacht daher den höchsten Aufwand.

### **4.3.3 Maßnahmen zur Verbesserung der Informationsversorgung**

Die Bereitstellung von Informationen durch die von den Werkern bevorzugten Quellen (Dokumente und Personen zur Absicherung) ist mit hohen Aufwänden verbunden. Die vorangegangenen Analysen zu Störungen im Montageprozess sowie zu deren Klärung durch Dritte haben ergänzend die Produktivitätsverluste für Werker und Bauleiter durch die personengebundene Informationsbereitstellung aufgezeigt.

Stationäre IT-Systeme sind aus wirtschaftlicher Sicht hoch effizient, weisen in der derzeitigen Form jedoch schwerwiegende Defizite hinsichtlich der physischen Erreichbarkeit (stationäre Rechnerterminals) sowie der Verständlichkeit der Informationen auf. Auch zeigt die vorangegangene Analyse der Informationsbedarfe, dass IT-Systeme derzeit nicht für alle benötigten Informationen als Bezugsquelle sinnvoll sind. Um mithilfe der Systeme gezielt die für den Produktionsprozess relevanten Informationen bereitzustellen, sind daher Änderungen notwendig: Allgemein müssen die IT-Systeme **zugänglicher gestaltet** werden, sodass sie, ähnlich einem gedruckten Dokument, von jedem Werker jederzeit und unmittelbar am Verbauort genutzt werden können. Ferner sind die **bereitgestellten Informationen zu filtern und für den individuellen Anwendungsfall zu**

**konkretisieren**, sodass die Systeme für Anwender eine echte Alternative zur Informationsbereitstellung durch Dritte darstellen. Zuletzt ist es notwendig, den **Umfang bereitgestellter Informationen so zu erweitern**, dass sämtliche Informationsbedarfe durch die Systeme gedeckt werden können.

Trotz der aufgezeigten Defizite weist die digitale Informationsbereitstellung ein hohes Potenzial auf, die Aufwände zur Bereitstellung, Beschaffung und Interpretation zu verringern und zugleich Abhängigkeiten zwischen Werkern und Informationslieferanten zu vermeiden und so langwierige Störungsketten aufzubrechen. Mit den zuvor aufgeführten Maßnahmen ließe sich eine Vielzahl von Störungsfällen vermeiden. Trotzdem würde auch eine hocheffiziente Bereitstellung von Informationen die aufgezeigte Störungssituation für den Bauleiter nur zum Teil verbessern (vgl. Abschnitt 4.2.3). Es bedarf weiterer Mechanismen zur schnellen Kommunikation von Störungen oder einem verzögerten Baufortschritt sowie zur kollaborativen Lösungsfindung. Digitale Werkzeuge in Form von Assistenzsystemen oder Messengern bieten grundsätzlich das Potenzial zur Abhilfe. Es bedarf jedoch eines integrierten Systems, das sämtliche dieser Lösungsansätze in einem einfach bedienbaren System vereint und so ein zentrales Werkzeug für Werker und Bauleiter darstellt.

## 4.4 Anforderungen

Die Ansätze zur Vermeidung bzw. Bewältigung von Störungen im Produktionsablauf und somit zur Steigerung der Prozesseffizienz lassen sich in vier Stufen gliedern (vgl. in Abschnitt 3.2). Die Analyse der grundlegenden Arbeitsprozesse, Störungen im Prozessablauf sowie der gegenwärtigen Informationsversorgung hat Herausforderungen aufgezeigt, die es vom Lösungskonzept zu bewältigen gilt. Die resultierenden Anforderungen werden mithilfe der identifizierten vier Stufen kategorisiert und im Verlauf der Konzepterstellung den einzelnen Lösungsprinzipien zugeordnet.

### 4.4.1 Stufe 1: Beherrschung von Abhängigkeiten

Der Problematik von Störungen könnte entgegengewirkt werden, indem Abhängigkeiten im Produktionsprozess vollständig eliminiert werden. Da sich dies sowohl prozedural als auch wirtschaftlich als unmöglich darstellt, gilt es, die unvermeidbaren Abhängigkeiten bestmöglich zu beherrschen, transparent zu gestalten und so eine Grundlage für nachfolgende, störungsvermeidende oder -bewältigende Maßnahmen zu schaffen.

#### **Anforderung A1-1: Schaffen eines einheitlichen Situationsbewusstseins**

Die vorangegangenen Analysen zeigen, dass die Abhängigkeiten zwischen den Produktionsprozessen für operative Mitarbeiter intransparent sind und sowohl Verzögerungen als auch Störungen im Produktionsablauf nicht oder mit falschen Adressaten kommuniziert werden. Die Beteiligten sind einander in der Regel unbekannt, gehören unterschiedlichen Fachdisziplinen und Unternehmen an und verfügen über ein unterschiedliches Vorwissen. Für eine effiziente Kommunikation ist es zunächst notwendig, ein einheitliches und umfassendes Situationsbewusstsein unter den Beteiligten zu schaffen. Dies ist eine Grundvoraussetzung für das Gelingen des kooperativen Handelns [Scha12, S. 149].

### **Anforderung A1-2: Schaffen eines einheitlichen und intuitiven Kommunikationskontextes**

Werden Informationen zwischen zwei Personen ausgetauscht, so formulieren bzw. interpretieren beide Seiten die Informationen bewusst oder unbewusst in einem bestimmten Zusammenhang (Kontext). Unterscheidet sich dieser Zusammenhang, kommt es in der Regel zu Missverständnissen. Ein einheitliches Situationsbewusstsein unter den beteiligten Personen (Anforderung A1-1) stellt im persönlichen Austausch eine gute Basis zur Vermeidung von Missverständnissen dar. Es bedarf jedoch zusätzlich einer Methodik, um den digitalen Austausch von Informationen so zu unterstützen, dass neben der Information auch der Kontext, auf den sie sich bezieht, erfasst, übertragen und für den Empfänger verständlich präsentiert werden kann.

#### **4.4.2 Stufe 2: Gezielte Bereitstellung relevanter Informationen**

Friedewald et. al. wiesen für die gezielte, digitale Bereitstellung von Fertigungsinformationen eine Produktivitätssteigerung von 30% für informatorische Tätigkeiten nach [Frie16, S. 152]. Die Analyse der Informationsversorgung im Ausrüstungsprozess hat weitere Potenziale aufgedeckt, da nicht nur die Form der bereitgestellten Informationen häufig zu Mehraufwänden führt, sondern eine Vielzahl von Informationen gar nicht zugänglich ist. Als Folge übernehmen Personen wie Bauleiter und Vorarbeiter neben ihren Haupttätigkeiten die Rolle von Informationslieferanten. Dies überlastet die Bauleiter, hält sie von ihren eigentlichen Aufgaben ab und verursacht für die Werker lange Wartezeiten und hohe Produktivitätsverluste.

### **Anforderung A2-1: Aufwandsarme Bereitstellung aktueller, aufgabenübergreifender Informationen**

Klassischerweise erhalten Werker, speziell für die ihnen zugetragene Montageaufgabe zusammengestellte, Fertigungsinformationen (klassischerweise als Papierunterlagen, bereitgestellt von der Arbeitsvorbereitung oder in digitaler Form gemäß dem Konzept von Halata). Aufgrund der besonders hohen Komplexität und Individualität im Ausrüstungsprozess werden jedoch häufig kurzfristig Informationen benötigt, die über den eigenen Aufgabenbereich hinausgehen. Typische Beispiele sind:

*Wann wird die angrenzende Baugruppe eingebaut? Wer ist der zuständige Ingenieur? Verlaufen hinter meiner Baugruppe Elektro- oder Wasserleitungen?*

Die Beantwortung dieser und ähnlicher Fragestellungen geschieht heutzutage in der Regel durch Dritte, die über die entsprechenden Berechtigungen und Kontakte verfügen, um die Informationen zu beziehen (vgl. Abschnitt 4.2.3). Gelänge es, diese Informationen dem Werker aktuell und aufwandsarm bereitzustellen, würde dies Wartezeiten und Laufwege reduzieren und Dritte wie Bauleiter und Vorarbeiter stark entlasten.

### **Anforderung A2-2: Kontextbezogene und intuitive Informationsaufbereitung**

Die vorangegangenen Analysen zeigen, dass der kognitive Aufwand zur Interpretation einer Information ein wesentliches Kriterium in der Wahl der Informationsquelle darstellt. Auch die Ausführungen von Halata führen zur Anforderung, die Informationssuche zu verkürzen, die Erfassung zu beschleunigen und ihre Interpretation zu vereinfachen [Hala18, S. 60]. Weil die Ausrüstungsmontage deutlich

mehr Informationen erfordert als die Sektionsmontage, reicht eine intuitive Gestaltung der Informationsdarstellung allein nicht aus. Vielmehr müssen die Informationen kontextbezogen gefiltert und dargestellt werden. Zugleich muss ein optionaler (und aufwandsarmer) Abruf weiterer Informationen ermöglicht werden.

#### **Anforderung A2-3: Nutzung mobiler, einfach zu handhabender und einfach zu erlernender Medien**

Um den Beschaffungsaufwand gering zu halten (vgl. Anforderung A2-1), ist die Nutzung mobiler Medien erforderlich. Dies hat auch die Analyse der Informationsversorgung (Abschnitt 4.3.2) bestätigt. Insbesondere in maritimen Ausrüstungsprozessen unterscheiden sich die Werker erheblich hinsichtlich ihrer Qualifikation und ihren Fähigkeiten. Zudem ist die Fluktuation häufig sehr hoch. Die Komplexität eingesetzter Medien ist daher gering zu halten und die Systeme sollten einfach bzw. eigenständig zu erlernen und zu bedienen sein.

#### **4.4.3 Stufe 3: Schnelle und gezielte Kommunikation von Störungen**

Das Risiko impliziter Störungen für den Ablauf abhängiger Produktionsprozesse ist groß: Ist eine Störung nicht bekannt, wird mit anschließenden Arbeiten fortgefahren, was im weiteren Verlauf zu Nacharbeiten oder Rückbau führt (vgl. Abbildung 18). Eine zentrale Anforderung an das Störungsmanagement ist es daher, Störungen und Rückstände im Baufortschritt schnell und gezielt zu kommunizieren, sodass diese explizit und für andere Arbeitsprozesse offensichtlich sind. Im besten Fall können Folgeprozesse Mehraufwände durch Umplanung vollständig vermeiden. Im schlimmsten Fall treten zwar Wartezeiten auf, Nacharbeiten und Rückbau können jedoch vermieden werden. Hierbei ist sowohl die Geschwindigkeit als auch die Adressierung der Kommunikation von hoher Bedeutung.

#### **Anforderung A3-1: Aufwandsarme Meldung des Baufortschritts**

Das Melden des gegenwärtigen Baufortschritts ist aus mehreren Gründen wichtig: Zum einen stellt der aktuelle Fortschritt den Ausgangspunkt für Planungen und Umplanungen dar. Bauleitern werden so beispielsweise Spielräume für alternative Arbeitspakete im Falle von Störungen aufgezeigt. Ergänzend zeigt der Vergleich des aktuellen Fortschritts mit dem Plan den gegenwärtigen Rückstand oder auch Vorsprung auf und ist so der Ausgangspunkt für Kapazitätsanpassungen. Für beide Anwendungen gilt: Je präziser der aktuelle Baufortschritt bekannt ist, desto besser. In der Praxis wird häufig darauf verzichtet, den Baufortschritt im Detail zu dokumentieren, weil der dafür erforderliche Aufwand den Nutzen übersteigt. Gelänge es jedoch, die Meldung des Baufortschritts aufwandsarm zu gestalten, könnten Unternehmen die Qualität von Planungen und Umplanungen verbessern und die Kapazitäten schneller und gezielter anpassen.

#### **Anforderung A3-2: Aufwandsarme Meldung von Produktionsstörungen**

Das Melden von Produktionsstörungen unterliegt (wie auch das Melden von Baufortschritten) aufgrund des damit verbundenen Aufwands einem Anreizdilemma (vgl. Abschnitt 4.1.3). Um dem zu begegnen, ist der Aufwand für die Meldung von Störungen auf ein sehr geringes Maß zu reduzieren, sodass die Werker Störungen schnell und detailliert erfassen und melden können. Dadurch kann es gelingen, schnell geeignete Maßnahmen zu treffen, die das Ausmaß der Störungswirkung begrenzen

und so abhängige Produktionsprozesse schützen.

#### **Anforderung A3-3: Kontextbezogene Darstellung von Baufortschritt und Störungen**

Eine detaillierte Bereitstellung des Baufortschritts und von Störungen birgt das Risiko einer Informationsübersorgung. Es ist daher erforderlich, auch diese Informationen auf den spezifischen Kontext des Anwenders filtern zu können.

#### **4.4.4 Stufe 4: Unterstützung einer kollaborativen Lösungsfindung**

Die Analyse realer Störungen im Prozessablauf zeigt, dass die gezielte Bereitstellung von Informationen eine Vielzahl von Störungen (im Beispiel: 45% der störungsbehafteten Arbeitszeit, vgl. Abbildung 28) vermeiden bzw. dessen Entstörung unterstützen kann. Aber auch Ermessensentscheidungen tragen zu einem hohen Anteil (im Beispiel: 35% der störungsbehafteten Arbeitszeit, vgl. Abbildung 28) zur Entstörung bei (vgl. Abschnitt 4.2.3). Es ist daher sinnvoll, die kollaborative Lösungsfindung im gestörten Prozess zu unterstützen.

#### **Anforderung A4-1: Überbrückung von Hierarchieebenen und Unternehmensgrenzen**

Die Organisation abhängiger Produktionsprozesse führt insbesondere bei einer starken Hierarchisierung sowie einer Vielzahl interner wie externer Beteiligter zu langen Kommunikationsketten. An den Schnittstellen entstehen zum einen Aufwände zur Informationsweitergabe. Zum anderen besteht das Risiko, Informationen zu verfälschen. Es ist daher erforderlich, Kommunikation über mehrere Hierarchieebenen und über Unternehmensgrenzen hinweg zu ermöglichen. Die aufwandsarme Kommunikation kann dazu verleiten, den Kommunikationskanal als Informationsquelle zu nutzen, was die Bauleiter mit vielen Anfragen überfrachten würde. Es sind daher Strukturen und Mechanismen zu gestalten, um die neuen Kommunikationswege sinnvoll zu steuern.

#### **Anforderung A4-2: Zeitversetzte Kommunikation**

Die Prozessbegleitungen zeigen, dass hohe Suchaufwände und Wartezeiten entstehen, um im Störfall den richtigen Ansprechpartner zu identifizieren, aufzufinden und das eigene Anliegen vorzubringen. Zudem wird heute ein Großteil der Störungen unmittelbar nach der erstmaligen Kommunikation diskutiert und entstört. Nur in wenigen Fällen findet eine differenzierte Bewertung bzw. Priorisierung des Störfalles statt. Ursächlich hierfür sind die gegenwärtigen Umstände (hoher Zeitdruck, persönliches oder telefonisches Vorbringen des Anliegens). Es ist davon auszugehen, dass nur ein kleiner Anteil der vorgebrachten Störungen einer sofortigen Entstörung bedarf. Daher ist es notwendig, Werkzeuge zu entwickeln, die eine zeitversetzte Kommunikation von Störungen ermöglichen. Dies würde es dem Bauleiter bzw. Vorarbeiter ermöglichen, sich den wichtigen und dringenden Problemen mit hoher Priorität zu widmen.

#### **Anforderung A4-3: Kommunikation in Echtzeit**

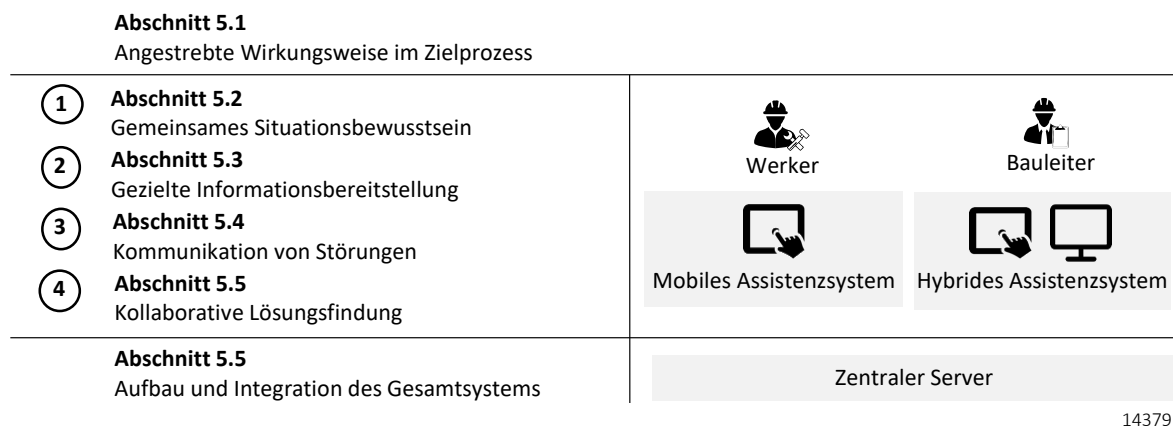
Die Analyse zeigt, dass die geringe Informationsqualität zum Zeitpunkt der erstmaligen Kommunikation einer Störung dazu führt, dass Entscheidungsträger häufig Vor-Ort-Begehungen durchführen, um sich selbst ein Bild der Lage zu machen. Dies führt zu Zeitaufwänden für Laufwege und aufgrund der gegenwärtigen Bewegungsmuster der Prozessbeteiligten (vgl. Abschnitt 4.1.2) zu Wartezeiten

und Produktivitätsverlusten der Werker. Um das Auftreten dieser Nebenzeiten zu vermeiden, sind Werkzeuge erforderlich, die eine Kommunikation in Echtzeit und aus der Ferne ermöglichen und zugleich eine hohe Informationsqualität wahren, sodass sie eine echte Alternative zu persönlichen Vor-Ort-Begehungen darstellen.

## 5 Digitale Assistenzsysteme für kollaboratives Arbeiten

In den vorangegangenen Kapiteln wurden vier zentrale Handlungsfelder hergeleitet, um Prozessstörungen in abhängigen Prozessen der Unikatproduktion zu vermeiden oder zu bewältigen. Im Folgenden wird ein Konzept entwickelt, das sich an diesen Handlungsfeldern orientiert und entsprechende Lösungen bietet. Das Konzept wurde im Verlauf dieser Ausarbeitung als Teil eines übergeordneten Softwaredemonstrators für Assistenzsysteme am Institut für Produktionsmanagement und -technik implementiert und bei ausgewählten Unternehmen im Betrieb getestet. Die Implementierung fand in enger Zusammenarbeit und mit Unterstützung von Herrn Niklas Jahn statt und ermöglicht es, die theoretische Ausarbeitung der folgenden Abschnitte mit Praxiseinblicken zu ergänzen. Der übergeordnete Softwaredemonstrator unterliegt einer stetigen Weiterentwicklung und stellt die Grundlage paralleler (z. B. [Jahn20], [Jahn20b] und [Jahn22]) sowie zukünftiger Forschungsaktivitäten am Institut dar.

Abschnitt 5.1 diskutiert zunächst allgemein die Wirkungsweise der Handlungsfelder anhand eines Beispielprozesses und liefert so einen Überblick über das entwickelte Gesamtsystem sowie den angestrebten Zielprozess. Anschließend werden die Teillösungen des Konzepts anhand der Handlungsfelder erarbeitet (vgl. Abbildung 32).



14379

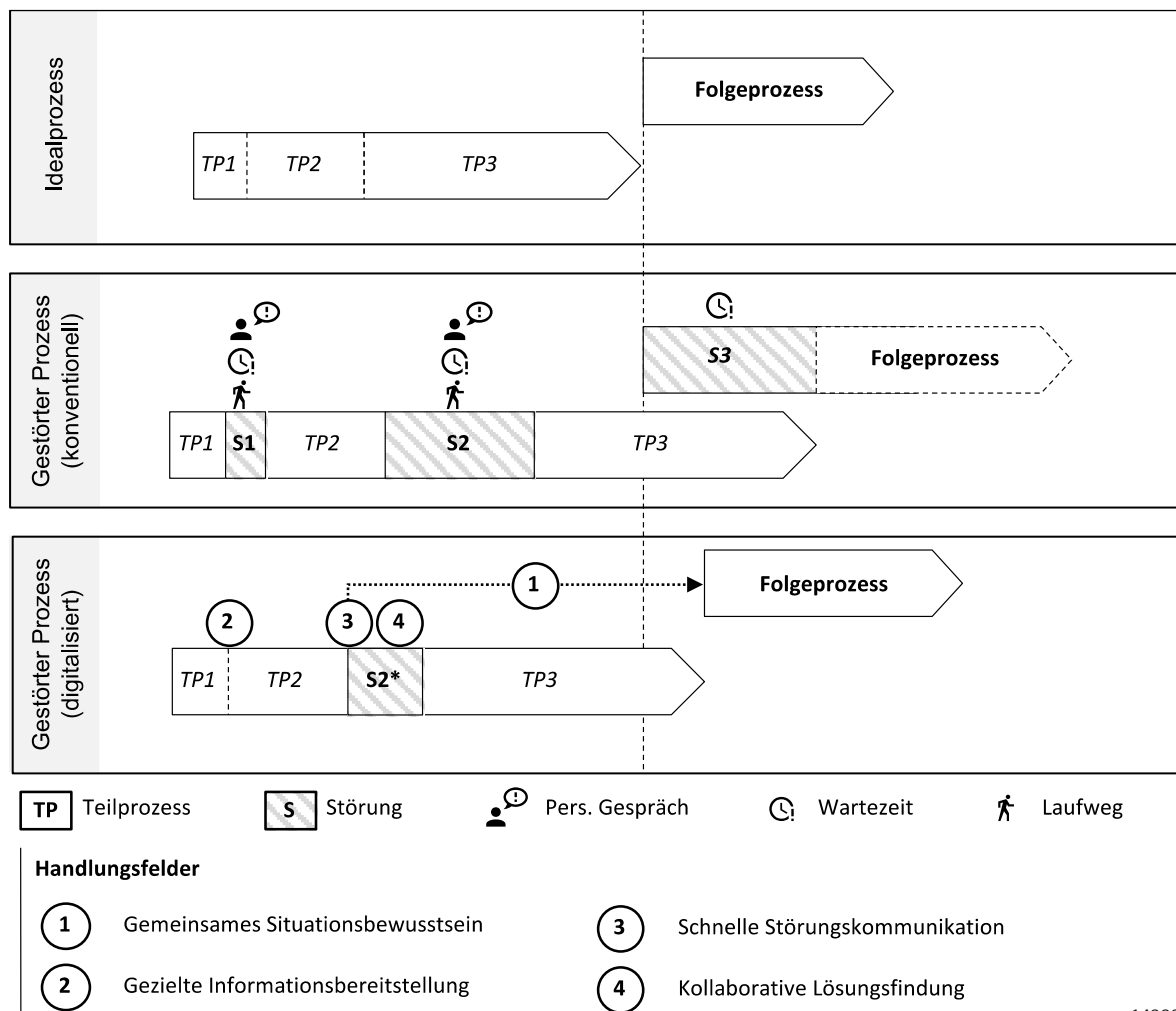
Abbildung 32: Überblick über das Konzept

Abschnitt 5.2 zeigt auf, wie ein gemeinsames Bewusstsein der Situation und ein einheitliches Verständnis der Abläufe und Abhängigkeiten im Produktionsprozess erzeugt werden kann. Dies ist erforderlich, um eine möglichst fehlerfreie und effiziente Kommunikation zu ermöglichen. Abschnitt 5.3 beschreibt, wie ein digitales Assistenzsystem aktuelle Informationen gezielt bereitstellen kann, sodass ein Teil der Störungen vermieden wird. Dazu sind geeignete Benutzeroberflächen und Werkzeuge zu gestalten, die Informationen situationsspezifisch konsolidieren und in verständlicher Form zur Verfügung stellen. Für die Kommunikation von Störungen, sind Werkzeuge zu gestalten, um diese frühzeitig und situationsbezogen zu erfassen, zu kommunizieren und für den Empfänger verständlich zu visualisieren (Abschnitt 5.4). Zusätzlich gilt es, die Entstörung (insbesondere bei Beteiligung Dritter) mithilfe digitaler Werkzeuge so zu unterstützen, dass die aus der Störung resultierenden Produktivitätsverluste auf ein Minimum begrenzt werden (Abschnitt 5.5). Zuletzt werden in Abschnitt 5.6 die entwickelten Assistenzsysteme zu einem Gesamtsystem integriert und um notwendige Schnittstellen zu Quellsystemen in der Unternehmens-IT ergänzt.

## 5.1 Angestrebte Wirkungsweise im Zielprozess

Durch geeignete Planung mit Puffern lassen sich Abhängigkeiten in Produktionsprozessen zwar minimieren, dies führt jedoch zu längeren Durchlaufzeiten und höheren Kosten. Bei einem störungsfreien Verlauf einzelner Prozesse sind Abhängigkeiten kein Hindernis für einen effizienten Produktionsablauf (vgl. Abbildung 33, oben), jedoch tritt dieser Idealfall aufgrund der Komplexität des Produkts allenfalls lokal und temporär ein.

Aufgrund vielfältiger Ursachen kommt es während der Produktionsprozesse zu Störungen. Die Entstörung ist insbesondere bei Beteiligung Dritter aufwändig und langwierig, da die kollaborativen Entstörprozesse gegenwärtig mit Laufwegen und hohen Wartezeiten verbunden sind (vgl. Abbildung 33, mittig). Je nach Verfügbarkeit, Aufenthaltsort und Auslastung der Bauleiter führen so selbst kleine Störungen zu Verzögerungen und hohen Produktivitätsverlusten. Mangelnde Kenntnis über die drohenden Auswirkungen auf Folgeprozesse erschweren die Zusammenarbeit, sodass Verzögerungen in den Folgeprozessen zu weiteren negativen Effekten führen.



14380

Abbildung 33: Störungen im innovierten Prozess

Ziel dieser Arbeit ist es, eine geeignete digitale Lösung für die Hauptakteure (Werker und Bauleiter) in den Störungs- bzw. Entstörungsprozessen zu entwickeln, die die identifizierten Handlungsfelder

umsetzt und die damit verbundenen Anforderungen erfüllt. Am Beispiel von Abbildung 33 unten soll die entwickelte Lösung in der Lage sein,

- Störung 1 durch eine gezielte Informationsbereitstellung zu vermeiden.
- Störung 2 unmittelbar an den Folgeprozess zu kommunizieren, sodass Störung 3 (Sekundärstörung) durch Umplanung vermieden werden kann.
- Störung 2 schneller zu entstören, weil ein persönliches Vor-Ort-Gespräch mit dem Bauleiter überflüssig wird.

Konkret werden hierzu drei, sich ergänzende Systeme entwickelt (vgl. Abbildung 32 rechts):

1. **Eine mobile Anwendung**, die Werkern die notwendigen Informationen in aufbereiteter Form zur Verfügung stellt und es ermöglicht, Baufortschritte zu protokollieren und Störungen zu melden sowie als Kommunikationsmedium zur kollaborativen Entstörung mit Dritten dient.
2. **Eine hybride Anwendung** für Bauleiter (mobil und stationär nutzbar), die es ermöglicht, Störungen zu verwalten, zu entstören sowie in kollaborativen Sitzungen zur Lösung von Problemen mit den Werkern in Kontakt zu treten.
3. **Ein zentraler Server**, der den Austausch sämtlicher, auf den Endgeräten der Anwender benötigten bzw. erzeugten Informationen organisiert.

Die Nutzung der Assistenzsysteme soll es ermöglichen, den Akteuren Abhängigkeiten zu Folgeprozessen zu verdeutlichen und sie so für mögliche Sekundärstörungen zu sensibilisieren (1). Die verbesserte Informationsversorgung soll einen Teil der Störungen vermeiden (2). Die verbleibenden Störungen sollen die Assistenzsysteme schnell kommunizieren (3) sowie (wenn notwendig) eine kollaborative Entstörung (4) unterstützen. Aufgrund der Menge von Informationen und der Häufigkeit ihrer Aktualisierung ist es unumgänglich, die Anwendungen automatisiert von einem zentralen Server mit Daten zu versorgen. Je häufiger die bereitgestellten Informationen zu aktualisieren sind, desto notwendiger wird die automatisierte Datenversorgung.

## 5.2 Gemeinsames Situationsbewusstsein

Situationsbewusstsein (im Englischen: *Situation Awareness*) ist nach Endsley eine wichtige Vorstufe der Entscheidungsfindung: Selbst der beste Entscheidungsträger trifft falsche Entscheidungen, wenn ungenaue oder unzureichende Informationen über die zugrundeliegende Situation vorliegen [Ends95, S. 36]. Endsley unterscheidet Situationsbewusstsein in drei Stufen: Wahrnehmung der Elemente und Begebenheiten in der Umgebung (Stufe 1), Interpretation der Wahrnehmung im Zusammenhang der aktuellen Situation (Stufe 2) und die Projektion dessen auf einen zukünftigen Status (Stufe 3) [Ends95, S. 36], [Rauc09, S. 4 ff.].

Ein gutes Situationsbewusstsein entsteht aus direkten Beobachtungen der realen Welt, einem System- und Schnittstellenverständnis sowie aus zugetragenen Informationen von Dritten [Ends00, S. 7]. Informationen durch Dritte sind besonders wichtig, wenn Entscheidungsträger nicht in der Lage sind, sich selbst ein Bild der Lage zu machen. Weiter betont sie die Notwendigkeit, Situationen im Lauf der Zeit immer wieder neu einzuschätzen, da sich Informationen verändern und zu abweichenden Entscheidungen führen können [Ends00, S. 4], [Rauc09, S. 5].

In der Praxis zeigt sich, dass Informationen häufig über große Distanzen ausgetauscht werden, ohne dass die Kommunikationspartner über ein einheitliches Bewusstsein der Situation verfügen. Insbesondere in Prozessen, in denen schnelle Reaktionen gefordert sind (wie zur Lösung von Prozessstörungen), ist nach Endsley so keine fundierte Entscheidungsfindung möglich. Ein gemeinsames und einheitliches Verständnis der Situation, auf die sich die Information bezieht, ist daher Grundvoraussetzung für das Gelingen des kooperativen Handelns.

Im Folgenden wird zunächst ein Konzept zur Gestaltung eines Kommunikationskontextes entwickelt (Abschnitt 5.2.1) sowie ein Vorgehen zur Anwendung dessen im digitalen Assistenzsystem erarbeitet (Abschnitte 5.2.2 und 5.2.3). Abschließend wird insbesondere auf die Organisation und Vermittlung eines guten Situationsbewusstseins eingegangen (Abschnitt 5.2.4).

### 5.2.1 Verortung als Informationskontext

In der Praxis finden sich verschiedene Herangehensweisen, um eine Kommunikation (meist unbewusst) in einen bestimmten Kontext zu setzen. Maßgebend für den (situativen) Kontext ist in der Regel der physische Ort (in diesem Zusammenhang der Raum oder das konkrete Bauteil), auf den sich die Kommunikation bezieht. Insbesondere in der unternehmensinternen Kommunikation werden deshalb oftmals Sachnummern verwendet, um persönlich oder im Schriftwechsel auf konkrete Situationen Bezug zu nehmen. Da Sachnummern unternehmensübergreifend in der Regel nicht bekannt sind, haben sich ergänzende, ortsbezogene Nomenklaturen etabliert. Beispielsweise wird im Schiffbau stets auf das Deck, die Feuerzone, einen Raum oder einen konkreten Bereich verwiesen. Diese Örtlichkeiten werden unternehmensübergreifend einheitlich bezeichnet und stellen für jeden Akteur im Prozess eine verständliche Eingrenzung des Kommunikationskontextes dar.

Das Vorgehen hat sich seit Jahren auf Werften etabliert, lässt jedoch insbesondere bei großen Räumen Spielraum für Missverständnisse. Eine weitere Detaillierung würde jedoch ein schnelles Erlernen der Systematik erschweren. Weiterhin ist Mitarbeitern der indirekten Bereiche oder neuen Mitarbeitern die mit dem Kontext verbundene Situation auf der Baustelle nicht unmittelbar bekannt. Eine detailliertere Systematik würde die Information daher zwar präzisieren, es aber nur bedingt erlauben, z. B. über die Schwere einer aufgetretenen Prozessstörung zu urteilen.

2D-Grundrisse in Papierform sind insbesondere im Bauwesen ein zentrales Informationsdokument in operativen Prozessen. Auch im Schiffbau ist in nahezu jedem Baubereich ein sogenannter Generalplan vorzufinden, der einen Gesamtüberblick über Zonen, Räume und Bereiche auf der Baustelle liefert. Die Pläne schaffen auch für fach- oder ortsfremde Personen ein situatives Verständnis, weil der Betrachter die räumlichen Verhältnisse und umgebenden Baugruppen im Baubereich zumindest grob erkennen kann. Zwar fehlen in den 2D-Übersichtsplänen zahlreiche Details und insbesondere die dritte Dimension, jedoch sind diese für das Verständnis der übermittelten Informationen nicht notwendigerweise relevant. Räumliche Höhen lassen sich beispielsweise aus der Information selbst erschließen (Bauteile am Boden, Bauteile an der Wand, Bauteile an der Decke).

Vor dem Hintergrund spontaner Kommunikationen während des Produktionsprozesses gestaltet sich die Nutzung der vermeintlich intuitiven Pläne jedoch als problematisch, da zunächst ein solcher Plan beschafft (und ggfs. ausgedruckt), die Information darin verortet und notiert und der Plan persönlich

oder in PDF-Form per E-Mail an den Empfänger übermittelt werden müsste. Die oftmals mitgeführten Pläne, die häufig mit Notizen angereichert werden, haben häufig das Problem einer mangelnden Aktualität.

Interaktive (sortier- und filterbare) Pläne können Informationen dagegen situationsgerecht zusammenfassen (Abbildung 34). Um Inhalte wie Störungsmeldungen oder den Baufortschritt trotz der zusätzlichen Verortung mit geringem Aufwand erstellen zu können (Anforderungen A3-1, A3-2), sind Werkzeuge zu gestalten, die den Anwender dabei unterstützen, verortete Inhalte zu erstellen (Abschnitt 5.2.2). Auch für den Informationsempfänger löst ein digitaler Plan noch nicht das Problem einer zunehmenden Unübersichtlichkeit. Um eine intuitive und situationsgerechte Darstellung der verorteten Informationen zu gewährleisten (Anforderungen A3-3, A2-2), sind zusätzlich Werkzeuge erforderlich, um die angezeigten, verorteten Inhalte zu filtern und situationspezifisch zu konsolidieren (Abschnitt 5.2.3).

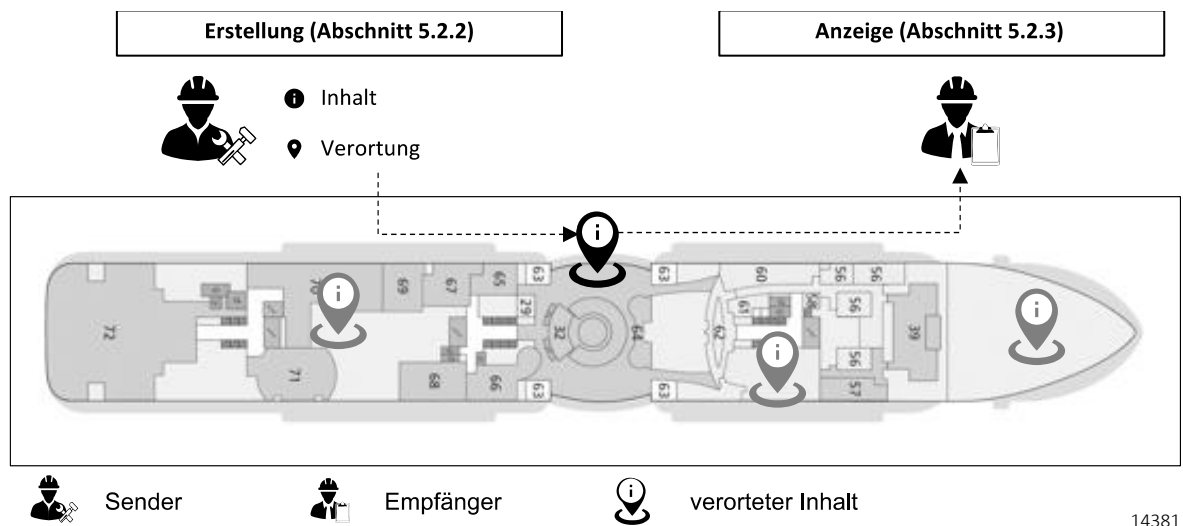


Abbildung 34: Verortung von Inhalten als Kontextbezug, Grundriss nach [AIDA22]

## 5.2.2 Bereitstellung verorteter Inhalte

Zur Verortung eines Inhalts (z. B. einer Störungsmeldung) ist es notwendig, diesem einen festen Platz (eine Position) in einem bestimmten Bezugssystem zuzuweisen [DWDS22]. Da sich viele komplexe Unikatprodukte über mehrere Stockwerke bzw. Decks erstrecken, schließt dies auch die räumliche Höhe mit ein. 3D-CAD-Systeme sind heutzutage sowohl im Bauwesen als auch im Schiff- und Flugzeugbau Standard in der Konstruktion. Das Gesamtmodell eines Gebäudes, eines Schiffs oder eines Flugzeugs wird in der Regel automatisiert aus Teilmodellen von Baugruppen oder Baubereichen zusammengesetzt. Im Gesamtmodell wird ein produktweit gültiges, globales Koordinatensystem definiert, das für alle Parteien ein eindeutiges Bezugssystem vorgibt. Die im Folgenden dargestellten Methoden zur Verortung von Inhalten nutzen das Bezugssystem des Gesamtmodells.

1. **Implizite Verortung durch Bauteilreferenz:** Materialattribute wie Lagerorte oder Liefertermine, Konstruktionsattribute wie Gewichte oder Verfahrensnotizen, Montageaufträge oder

auch Störungs- und Fortschrittmeldungen beziehen sich in der Regel auf konkrete Stücklistenpositionen. In den IT-Systemen der Produzenten werden Bauteilreferenzen (in der Regel als Sachnummern) häufig als Primärschlüssel in Datenbanken eingesetzt. Die Angabe ist somit elementar für eine automatische Verarbeitung von Informationsinhalten. Die Referenz liegt entweder explizit (z. B. in bauteilbezogenen Attributlisten) oder implizit in beschreibenden Texten (z. B. von Störungsmeldungen) vor. Gelingt es, diese Referenzen zu extrahieren und konkreten Knoten im 3D-Modell zuzuordnen, so ist die Verortung der jeweiligen Inhalte sehr einfach. Problematisch ist dieser Ansatz immer dann, wenn sich Inhalte auf große Bauteile oder ganze Baugruppen beziehen. Die Verortung des Inhalts wäre infolgedessen ggf. zu ungenau.

2. **Explizite Verortung im 3D-Modell:** Viewer für 3D-Inhalte erlauben es, Notizen und Anmerkungen direkt im betrachteten 3D-Modell bzw. auf konkreten Bauteilgeometrien zu platzieren. Grundsätzlich ließe sich dieses Vorgehen auch auf das Erstellen von anderen Inhalten wie beispielsweise Störungs- oder Baufortschrittmeldungen übertragen. Hierzu ist es jedoch notwendig, sich zunächst im entsprechenden 3D-Modell zu orientieren und die Verortung anschließend händisch vorzunehmen. Eine genaue Positionierung (z. B. bei der Dokumentation eines Kratzers auf einer großen Fläche) ist kaum möglich und führt zudem zu kognitiven Aufwänden beim Umdenken zwischen der realen und der virtuellen Umgebung.
3. **Implizite Verortung durch die Nutzung von Augmented Reality:** Zur Darstellung digitaler Inhalte als Überlagerung zur Realität ermitteln AR-Systeme ihre Position relativ zum darzustellenden Inhalt. AR-Systeme nutzen diese Funktionalität heute ausschließlich zur Visualisierung, jedoch lässt sich die vom Tracking ermittelte Position mittels Koordinatentransformation einfach in den Kontext des Produktkoordinatensystems umrechnen. Die extrahierte Position kann dann unmittelbar als Referenz für erstellte Inhalte genutzt werden, ohne dass hierzu ein händischer Mehraufwand notwendig ist.

Die drei genannten Methoden, Inhalte zu verorten, unterscheiden sich im teils händischen Aufwand, der Genauigkeit und in den notwendigen Voraussetzungen (vgl. Abbildung 35). Aufwand und Genauigkeit wurden qualitativ auf einer vierstufigen Skala von gering bis sehr hoch bewertet.

	Aufwand	Genauigkeit	Voraussetzung
1. Implizite Verortung durch Bauteilreferenz	hoch	mittel	Teilenummer bekannt
2. Explizite Verortung im 3D-Modell	mittel	hoch	3D-Modell vorhanden
3. Implizite Verortung durch die Nutzung von AR	gering	sehr hoch	3D-Modell vorhanden Tracking vorhanden

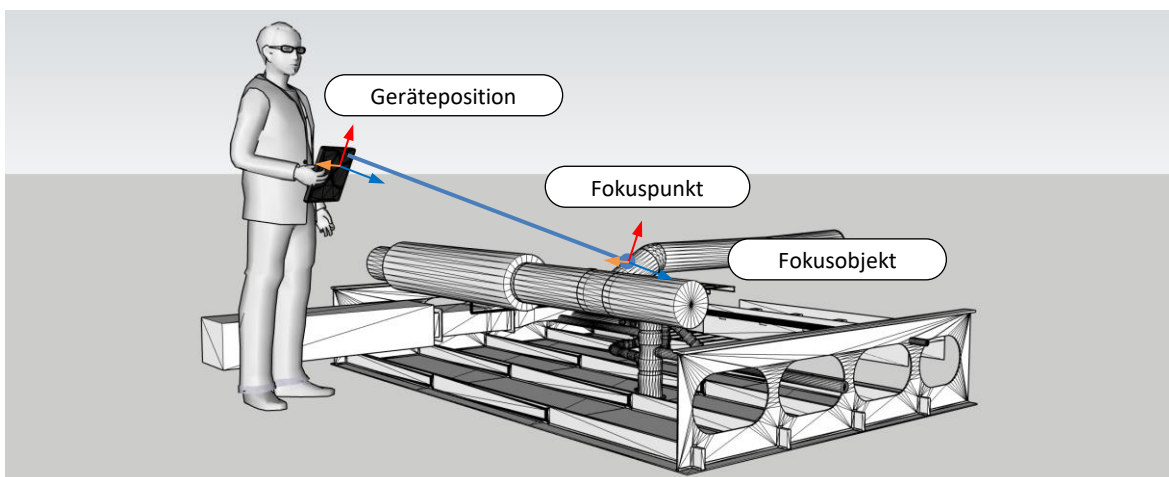
14382

Abbildung 35: Bewertung der Methoden zur Erstellung verorteter Inhalte

**Implizite Verortung durch Bauteilreferenz:** Ohne ein digitales Assistenzsystem ist es aufwändig, Inhalte durch eine Bauteilreferenz zu verorten: Der Nutzer muss die Sachnummer herausfinden und diese (in der Regel händisch) gemeinsam mit dem Inhalt eintragen. Der Aufwand und das Fehlerpotenzial sind hoch. Zudem ist der Ansatz bei großen Bauteilen wie Wandpaneelen sehr ungenau, da der genaue Ort der Störung auf dem Bauteil nicht präzisiert werden kann. Nutzt der Anwender dagegen ein digitales Assistenzsystem, vereinfacht sich das Vorgehen stark, da das betroffene Bauteil (und die damit verknüpfte Sachnummer) direkt ausgewählt werden kann.

**Explizite Verortung im 3D-Modell:** Ist ein 3D-Modell vorhanden, so lassen sich die Inhalte in einem entsprechenden Assistenzsystem deutlich präziser mit dem Wirkungsort in Verbindung bringen: Es kann neben dem Bauteil auch ein Ort auf dem Bauteil ausgewählt werden. Die Sachnummer wird automatisch übernommen und das System ist somit weniger fehleranfällig. Dennoch muss der Anwender bei diesem Vorgehen zunächst im Assistenzsystem zu dem entsprechenden Bereich im Schiff navigieren und eine sinnvolle Perspektive einstellen. Zudem ist die Verortung auf dem Bauteil nur eine Schätzung, da der Anwender keinen direkten Abgleich mit dem realen Störungsort vornehmen kann.

**Implizite Verortung durch die Nutzung von AR:** Werden die Inhalte in einem AR-fähigen Assistenzsystem dokumentiert, so bietet das enthaltene Tracking die Möglichkeit, das betroffene Bauteil, die verknüpfte Sachnummer und zusätzlich die genaue Position auf dem Bauteil ohne manuellen Aufwand automatisiert zu extrahieren und den Inhalt somit sehr genau zu verorten. Abbildung 36 zeigt die technische Umsetzung und erweiterte Nutzungsmöglichkeit der Verortung mit AR: Anhand der vom AR-System ermittelten Geräteposition kann durch Extrapolation der Blickrichtung das aktuell betrachtete bzw. ausgewählte Bauteil (Fokusobjekt) und zusätzlich der konkrete Punkt auf der Bauteiloberfläche (Fokuspunkt) ermittelt werden.



14383

Abbildung 36: Nutzung von AR zur erweiterten Verortung

Inhalte wie Störungsmeldungen oder Fotos lassen sich so präzise verorten und zugleich automatisch mit ergänzenden Informationen (insbesondere die Sachnummer des Fokusobjekts) anreichern, um beispielsweise die Verarbeitung in weiteren IT-Systemen zu vereinfachen. Auch ist es möglich, das betroffene Bauteil direkt in der AR-Ansicht auszuwählen bzw. den Punkt für eine Störungsmeldung so manuell zu verschieben.

### 5.2.3 Anzeige und Konsolidierung verorteter Inhalte

Um für den Empfänger einer Information das notwendige Situationsbewusstsein zu schaffen, ist es notwendig, die verorteten Inhalte im Zusammenhang mit der Umgebung darzustellen. Hierfür bestehen grundsätzlich zwei Möglichkeiten: Die Darstellung der Inhalte in 2D-Plänen sowie die Darstellung der Inhalte in 3D-Modellen. Ergänzend ist es notwendig, die verorteten Inhalte situationsspezi-

fisch zu filtern, da die Darstellungen mit zunehmender Zeit für den Anwender unübersichtlich werden würden. Weiterhin ist der Inhaltstyp zu definieren, um unterschiedliche Inhalte in der Darstellung voneinander differenzieren zu können.

### Anzeige in 2D-Plänen

Abbildung 37 zeigt links den Grundriss eines Schiffs, der um verortete Störungsmeldungen ergänzt wurde. Hierbei ist es nicht von Belang, ob die Verortung implizit (durch eine hinterlegte Sachnummer) oder explizit durch die Nutzung eines 3D-Viewers oder einer AR-Unterstützung erfolgt ist. Zwar ist die räumliche Höhe der Verortung für den Anwender nicht mehr zu erkennen, dafür ist die Darstellung für ein Deck bzw. eine Etage besonders übersichtlich.



14384

Abbildung 37: Anzeige verorteter Inhalte in AR und in 2D-Plänen

Die zweidimensionale Darstellungsform bietet den Vorteil, auf einen Blick einen Gesamtüberblick über den kompletten Baubereich zu erhalten. Zur Verdeutlichung von (beispielsweise Störungs-) Häufungen wurde eine sogenannte Heatmap implementiert. Diese erkennt lokale Häufigkeiten und wandelt diese in eine Farbskala um.

### Anzeige im 3D-Modell

Insbesondere bei der Analyse einer Störung vor Ort ist die räumliche Höhe zur Einordnung notwendig. Auch gestaltet sich der Übertrag von einem 2D-Plan auf die räumliche Umgebung als aufwändig. Die Verortung direkt in einem 3D-Modell kann dieses Problem lösen und bietet zudem die Möglichkeit, verortete Inhalte durch die Nutzung von AR direkt als Überlagerung zur Realität anzuzeigen (vgl. Abbildung 37, rechts). Dies verringert den kognitiven Aufwand zur Interpretation weiter und ermöglicht es (im Falle einer präzisen Verortung), den konkreten, betroffenen Punkt auf einem Bauteil zu identifizieren.

## 5.2.4 Schaffen, Vermitteln und Nutzen eines hohen Situationsbewusstseins

Klassischerweise erhalten Werker ihre Arbeitsanweisungen in Form von Zeichnungen, Maßangaben

und textuellen Zusatzinformationen. Anmerkungen oder Störungen zu Bauteilen werden in umfangreichen Listen gesammelt und zumeist bereichsweise verwaltet. Mithilfe digitaler Assistenzsysteme (vgl. Abschnitt 2.4.1) gelingt es, neue Wege der Informationsbereitstellung zu erschließen und beispielsweise interaktive 3D-Modelle bereitzustellen. Entsprechende Werkzeuge helfen, mit den Modellen zu interagieren, z. B., um Maße zu identifizieren oder Informationen aus umfangreichen Listen zu entnehmen.

Es stellt sich jedoch die Frage, wie die digitale Informationsbereitstellung so gestaltet werden kann, dass sie dem Werker für eine konkrete Montageaufgabe nicht nur sämtliche Informationen auf digitalem Weg bereitstellt, sondern diese möglichst aufwandsarm (im besten Fall automatisiert) so aufbereitet, dass sie ihm ein besseres Bewusstsein über die vorliegende Situation verleiht. Hierzu genügt es nicht, den unidirektionalen Informationsfluss von indirekten zu direkten Bereichen zu untersuchen (und zu digitalisieren). Vielmehr gilt es ein dynamisches System zu schaffen, das Informationen (beispielsweise über Störungen) in Echtzeit erfasst, automatisch für die korrekten Adressaten aufbereitet und situationsspezifisch visualisiert. Die Verortung von Inhalten kann diese Anforderung erfüllen: Der Anwender kann Informationen für beliebige Orte einblenden und so z. B. an einem konkreten Montageort nach Störungen suchen. Dazu ist es nicht erforderlich, dass sich Empfänger und Sender kennen.

Im nachfolgenden Abschnitt wird das Thema gezielter (situationsspezifischer) Informationsbereitstellung vertieft und ein mobiles Assistenzsystem für Werker entwickelt, das insbesondere zum Ziel hat, dem Anwender ein hohes, auf eine konkrete Aufgabe bezogenes Situationsbewusstsein zu verleihen. Im weiteren Verlauf dieses Kapitels wird der Fokus auf die aufwandsarme, aber informationsreiche Meldung von Störungen gelegt. Der Anwender wird so in die Lage versetzt, dem Empfänger ein detailliertes Verständnis über die vorliegende Situation zu vermitteln.

### 5.3 Gezielte Informationsbereitstellung

Fehlende oder unzureichend aufbereitete Informationen sind eine wesentliche Ursache für Prozessstörungen (vgl. Abschnitt 4.2.3). Die gezielte Bereitstellung von Informationen für Werker dient dazu,

- dem Werker sämtliche Informationen bereitzustellen, die er für seine Arbeitsaufgabe benötigt,
- Zugang zu weiteren, nicht unmittelbar die Arbeitsaufgabe betreffenden Informationen zu gewähren,
- Informationen situationsbezogen und intuitiv aufzubereiten, sodass der kognitive Aufwand zur Interpretation möglichst gering ausfällt und
- möglichst einfache und intuitive Formen der Visualisierung zu nutzen, um den Handhabungs- und Schulungsaufwand zu minimieren.

Die genannten Ziele setzen somit die Anforderungen um, aktuelle Informationen aufgabenübergreifend bereitzustellen (A2-1), diese kontextbezogen und leicht verständlich aufzubereiten (A2-2) und auf mobilen Endgeräten bereitzustellen (A2-3). Im Folgenden wird zunächst anhand der identifizierten Informationsbedarfe ein Modell entwickelt, das die allgemeingültigen Zusammenhänge unter-

schiedlicher Informationen darstellt (Abschnitt 5.3.1). Im Anschluss werden die Grundlagen der mobilen Anwendung für Werker geschaffen (Abschnitt 5.3.2) und spezifische Techniken für den Einsatz von AR in großen Umgebungen (Abschnitt 5.3.3) sowie für die Verarbeitung und Visualisierung (Abschnitt 5.3.4) komplexer Geometrien entwickelt. Anschließend wird ein Konzept zur multimodalen Interaktion mit den bereitgestellten Informationen erarbeitet und umgesetzt (Abschnitt 5.3.5). Die kontextbezogene Gestaltung des Arbeitsplans (Abschnitt 5.3.6) zielt auf eine intuitive und aufwandsarme Bedienung ab und wird durch die Bereitstellung von Zusatzinformationen sowie um Werkzeuge zur problemorientierten Informationsfilterung (Abschnitt 5.3.7) ergänzt. Es hat sich gezeigt, dass die Abnahme und Neuzuteilung von Aufgaben einen hohen Stellenwert in unerwünschten Nebenzeiten einnehmen und die transparente Kommunikation von Baufortschritten eine Grundvoraussetzung für die effizientere Gestaltung dieser Tätigkeiten darstellt. Abschnitt 5.3.8 entwickelt daher manuelle sowie automatische Werkzeuge zur aufwandsarmen Fortschrittmeldung.

### 5.3.1 Informationsmodellierung

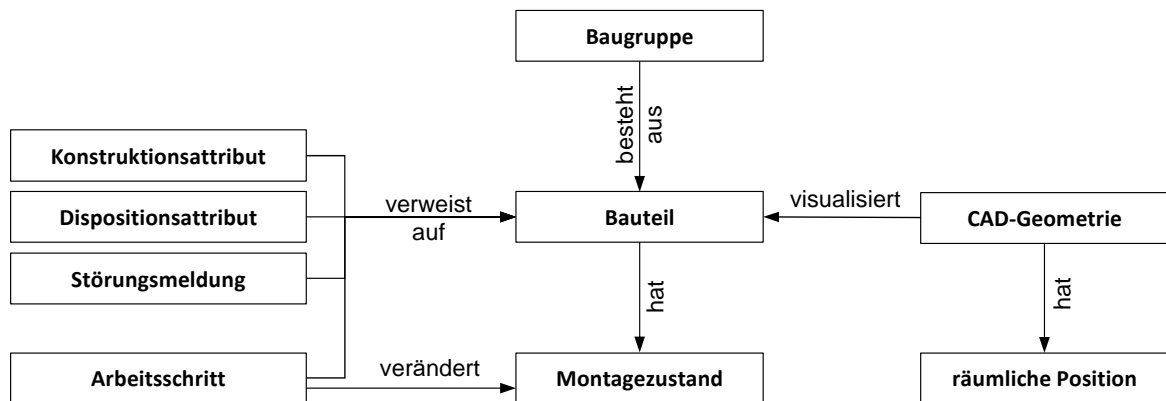
Unabhängig vom Arbeitsbereich muss der Werker die folgenden Fragen beantworten: Wann muss was wie und wo montiert werden [Hala18, S. 65]? Die Frage, **wann** etwas zu montieren ist, wird durch eine (oftmals selbstbestimmte) Arbeitsreihenfolge bestimmt. Eine Stückliste und das korrespondierende 3D-Modell der zu montierenden Baugruppe liefern durch entsprechende Darstellungsformen ein leicht verständliches Bild darüber, **was** und **wo** etwas zu montieren ist. **Wie** etwas zu montieren ist, wird in der Regel durch entsprechende zusätzliche Verfahrenshinweise beantwortet.

Die Analyse der Arbeitsabläufe in der Ausrüstungsmontage hat ergeben, dass das Aufgabenprofil der Werker häufig nicht nur die Montagetätigkeit einschließt, sondern sie darüber hinaus auch die Beschaffung und den Transport einzelner Materialien und Hilfsmittel übernehmen (vgl. Abbildung 20). Auch müssen Werker immer wieder bewerten, ob ein (leicht) beschädigtes Bauteil noch montiert werden kann, repariert oder neu beschafft werden muss. Es gilt daher neben den oben genannten Fragen auch zu beantworten, **woher** das Material ggfs. zu beschaffen ist und **ob** der Arbeitsplan durchführbar ist.

Die Suche nach geeigneten Informationen bzw. Informationskategorien zur Beantwortung der Fragestellungen führt zur nachfolgend dargestellten Gegenüberstellung:

<b>Was?</b>	Sachnummer (Bauteil / Baugruppe)
<b>Wann?</b>	Arbeitsplan (mit Arbeitsschritten) / Fortschritt von Vorarbeiten
<b>Ob?</b>	Relevante Störungsmeldungen
<b>Woher?</b>	Dispositionsattribut
<b>Wie?</b>	Konstruktionsattribut
<b>Wo?</b>	CAD-Geometrie

Jede der genannten Informationen lässt sich in der Regel (implizit oder explizit) einem konkreten Bauteil zuordnen (vgl. Abbildung 38). Das Bauteil bzw. dessen (eindeutige) Sachnummer stellt somit ein zentrales und verknüpfendes Element zwischen sämtlichen produktionsrelevanten Informationen dar. Ausgehend von einem Bauteil lassen sich alle direkt in Beziehung stehenden Informationen, wie z. B. dessen Montagezustand, Konstruktions- oder Dispositionsattribute oder vorhandene Störungsmeldungen, identifizieren und konsolidieren.



14385

Abbildung 38: Produktionsrelevante Daten im Klassendiagramm

Der skizzierte Zusammenhang stellt die Grundlage der im weiteren Verlauf zu konzipierenden Funktionalitäten dar.

### 5.3.2 Grundlagen des mobilen Assistenzsystems für Werker

Werker tragen im Produktionsablauf unmittelbar zur Wertschöpfung bei. Stationäre Lösungen zur digitalen Informationsbereitstellung führen zu Laufwegen und Wartezeiten und im Vergleich zu mobilen Anwendungen zu Mehraufwänden und Produktivitätsverlusten (vgl. Abschnitt 4.3.2). Mobilität ist somit eine Grundvoraussetzung, um einfach nutzbare Informations- und Kommunikationskanäle zu ermöglichen und trägt unmittelbar zur Erfüllung diesbezüglicher Anforderungen (A2-1, A2-3, A3-1, A3-2, A4-2, A4-3) bei. Die zu entwickelnde mobile Anwendung soll das zentrale Informations- und Kommunikationsmedium für den Werker sein. Die unter anderem von Halata formulierten Anforderungen an die digitale Informationsversorgung [Hala18, S. 51 ff.] behalten somit auch für dieses Konzept ihre Gültigkeit. Aufgrund der veränderten Zielsetzung des Assistenzsystems für Werker der Ausrüstungsmontage bedarf es jedoch wesentlicher Anpassungen. Im Folgenden wird zunächst eine Hardwareplattform ausgewählt und aufgezeigt, wie die interaktive 3D-Informationsanzeige anzupassen und eine AR-Unterstützung in den Arbeitsablauf zu integrieren sind.

#### Hardwareplattform

In der industriellen Praxis haben sich sowohl Tablet-PCs als auch Smartphones als geeignete Hardwareplattformen im Produktionsumfeld bewährt. In ausgewählten Anwendungsbeispielen sind auch Smart Glasses denkbar. Smartphones und Tablets bieten gegenüber Smart Glasses jedoch den Vorteil, den Anwendern zumeist aus dem privaten Gebrauch bekannt und in der Handhabung vertraut zu sein (Anforderung A2-3). Ein weiterer Vorteil gegenüber Smart Glasses besteht in der deutlich einfacheren Eingabe von Informationen (notwendig z. B. bei der Dokumentation von Störungsmeldungen). Obwohl Smartphones klare Vorteile in Hinblick auf Mobilität aufweisen, sind Nachteile in Bezug auf die Darstellung von und Interaktion mit komplexen 3D-Geometrien zu erwarten. Im weiteren Verlauf wird das Konzept daher beispielhaft anhand eines Tablets als Hardwareplattform entwickelt. Grundsätzlich lassen sich die Visualisierungs- und Bedienkonzepte jedoch auf andere Plattformen übertragen (vgl. [Jahn20, S. 541 ff.]).

### Interaktive 3D-Informationsanzeige

Die Montage von Baugruppen erfordert räumliches Vorstellungsvermögen. Die ergänzende Darstellung von dreidimensionalen Modellen zu den Arbeitsanweisungen ist daher gegenüber einer rein zweidimensionalen Darstellung (Fertigungszeichnung) vorteilhaft, weil sie die kognitive Belastung des Werkers verringert. Zudem spart die direkte Darstellung der 3D-Modelle die hohen Aufwände zur Erstellung oder Ableitung von technischen Zeichnungen [Hala18, S. 45]. Analysen belegen, dass sich insbesondere bei Aufgaben mit hoher Komplexität sowohl die Produktivität als auch die Qualität und Nutzerzufriedenheit verbessern (vgl. Abbildung 39).

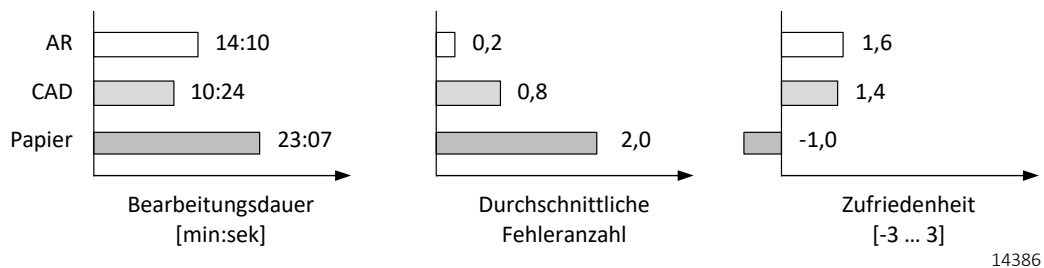


Abbildung 39: CAD- und AR-Unterstützung in digitalen Arbeitsunterlagen, in Anlehnung an [Frie16, S. 152].

Die in der Unikatproduktion vorherrschende hohe Produktkomplexität spiegelt sich in der Komplexität der konstruierten CAD-Modelle wider. Insbesondere im Innenausbau beinhalten die Modelle neben mechanischen Bauteilen auch dekorative (häufig frei geformte) Elemente, Elektronikkomponenten, Kabel und Rohrverläufe sowie diverse Normteile und Zukaufteile. Die hohe Komplexität führt auf der einen Seite zu technischen Problemen bei der Verarbeitung auf mobilen, leistungsschwachen Endgeräten und erzeugt auf der anderen Seite eine hohe kognitive Belastung für den Anwender. Es bedarf daher konkreter Strategien zur Verarbeitung und Visualisierung (Abschnitt 5.3.4) komplexer Geometrien.

### Augmented-Reality-Unterstützung

Die ergänzende AR-Darstellung der dreidimensionalen, virtuellen Inhalte als Überlagerung zur Realität kann die Anzahl fehlerhaft montierter Bauteile deutlich senken (vgl. Abbildung 39 mittig). Es ist zu vermuten, dass die AR-basierte Darstellung die kognitive Belastung des Anwenders senkt und die Handhabung des Systems vereinfacht (Anforderung A2-3). Im industriellen Einsatz ist die Wahl eines geeigneten Trackingverfahrens ein wichtiger Einflussfaktor auf die Einsatzfähigkeit und nicht zuletzt auch Wirtschaftlichkeit eines AR-gestützten Assistenzsystems. Um einen wirtschaftlichen Nutzen nicht zu gefährden, muss das Trackingverfahren ohne aufwändige Vorarbeiten sowie Einrichtungsvorgänge auskommen (A2-1) und sollte direkt vom Endanwender und ohne spezifische Schulungen einsetzbar sein (A2.3). Abschnitt 5.3.3 erarbeitet hierzu ein angepasstes Verfahren für den Einsatz in großen, unbekanntenen Umgebungen als primärem Einsatzszenario der Ausrüstungsmontage eines Unikatprodukts.

#### 5.3.3 Trackingverfahren für große Umgebungen

Gängige Trackingtechnologien kombinieren ein initiales und ein inkrementelles Tracking: Eine bekannte und vermessene Referenzmarke in der realen Umgebung dient dazu, das Gerät initial in einem fest definierten Koordinatensystem zu verorten. Das inkrementelle Tracking führt die Verortung

fort, wenn die Referenzmarke temporär nicht vom Gerät erkannt wird. Die inkrementelle Komponente des Trackings wird im Wesentlichen vom Endgerät und der darin verbauten Sensorik bestimmt. Für das Initialtrackingsystem stehen im Wesentlichen zwei Alternativen zur Auswahl:

1. **Markertracking:** Ein zweidimensionaler Marker (kontrastreiches Muster, z. B. ein QR-Code) wird in der realen Umgebung in Bezug auf ein Koordinatensystem (z. B. Schiffskoordinatensystem) eingemessen und platziert. Erfasst das AR-Gerät den Marker im Kamerabild, kann die Geräteposition mittels inverser Transformation ermittelt und der virtuelle Inhalt pose-richtig angezeigt werden.
2. **Objekttracking:** Ein dreidimensionales Objekt (z. B. eine Maschine) wird mittels Kantenextraktion im Kamerabild erkannt und es kann wiederum mittels inverser Transformation auf die Gerätepose geschlossen werden.

Die Vorteile eines objektbasierten Trackings bestehen in einem niedrigen Vorbereitungs- und Einrichtungsaufwand. Es muss jedoch ein unsymmetrisches, für das System unverwechselbares Objekt vorhanden und dessen Geometrie bekannt sein. In der Anwendung in einem Produktionsszenario stellt diese Voraussetzung in der Regel ein kaum zu lösendes Problem dar: Es sind zwar bekannte Geometrien vorhanden (Rohbau / Stahlbau), diese besitzen jedoch zum einen systemisch keinen hohen Wiedererkennungswert und werden zum anderen von den einzubauenden Bauteilen voranschreitender Arbeit zunehmend verdeckt.

Markertracking hingegen ist technisch zwar weitaus besser geeignet, bedarf jedoch im Normalfall aufwändiger Vorarbeiten und einer konkreten Einrichtung. Halata und Moskopp implementierten zur Unterstützung des Anwenders einen mehrstufigen Ansatz [Hala18, S. 110], [Mosk16 S. 99ff.]: Durch einen QR-Code oder ein NFC-Tag wird das System grob initialisiert und erhält Informationen über die zu verwendende Markerposition. Ein zusätzlicher, fest im Bauraum angebrachter und vermessener Fußpunkt dient zur Aufnahme eines Markers, der wiederum dann das eigentliche, initiale Tracking einleitet. Der Anwender platziert den Marker im Fußpunkt und kann die Arbeit beginnen.

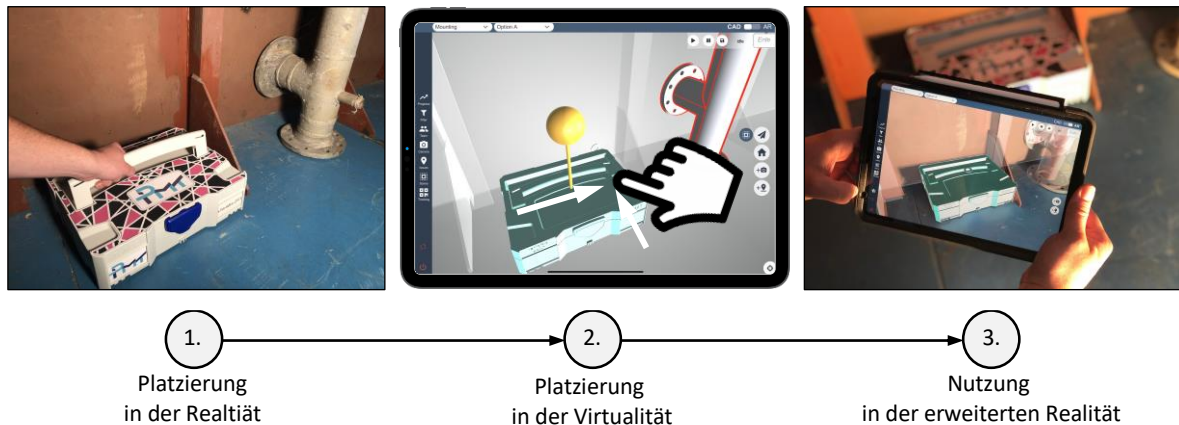
Aus Sicht des Anwenders ist dieser Prozess als sehr aufwandsarm zu bewerten, jedoch sind zur Planung, Erstellung, Anbringung der Identifikationscodes und insbesondere zum Einmessen der zugehörigen Fußpunkte erhebliche Vorarbeiten notwendig, die sich nur in Einzelfällen automatisieren lassen. Auch besteht das Risiko, dass kein geeigneter Fußpunkt in der Nähe des konkreten Arbeitsraumes verfügbar ist und das System so nicht genutzt werden kann.

### Dynamische Markerpositionierung

Grundidee der dynamischen Markerpositionierung ist es, einen Referenzmarker in der Realität anzubringen, dessen Position und Orientierung zu erfassen und dem AR-System bereitzustellen, damit dieses bei der Erkennung des Markers die eigene Position im Raum korrekt bestimmen kann. Man kann dies durch geschicktes Ausnutzen vorhandener Geometrien erheblich vereinfachen: Platziert man den Marker nicht frei im Raum, sondern beispielsweise in der Ecke eines Raumes und vollzieht denselben Vorgang in einem virtuellen Abbild des Raumes, so lässt sich die Position und die Orientierung des Markers mithilfe des virtuellen Raums exakt bestimmen.

In der technischen Umsetzung wurde zunächst ein kontrastreicher, sich farblich von der klassischen

Industrienumgebung abhebender Marker entwickelt (vgl. Abbildung 40, links). Damit sich der Marker einfach in der physischen Umgebung bewegen und platzieren lässt, wurde dieser auf der Oberseite einer flachen Werkzeugbox befestigt, die zugleich der Aufbewahrung und dem Transport des Tablets dient. Nachdem der Anwender den Marker an einer beliebigen, für ihn passenden Position platziert hat (1), vollzieht er denselben Vorgang im CAD-Visualisierungsmodus des mobilen Assistenzsystems (2).



14387

Abbildung 40: Verfahren der dynamischen Markerpositionierung

Stimmen die virtuelle und die reale Position überein, kann direkt mit der Arbeit begonnen werden (3). Zwar erhöht das Verfahren den Aufwand auf Seite des Anwenders geringfügig, bietet ihm jedoch auch ein deutlich erhöhtes Maß an Flexibilität. Ferner wird jegliche andere Form der Vorarbeit vollständig vermieden.

Die nachfolgenden Abschnitte befassen sich mit der Entwicklung eines geeigneten Visualisierungskonzepts sowie adäquaten Formen der Interaktion.

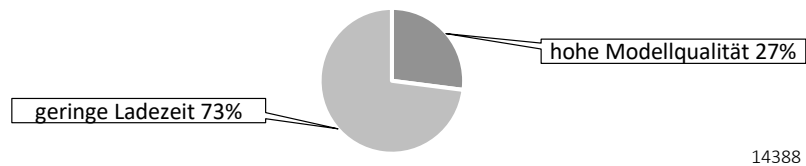
### 5.3.4 Visualisierung komplexer Geometrien

Die Rechenleistung mobiler Endgeräte ist vergleichsweise gering. Insbesondere gilt dies für die Ressourcen des Arbeitsspeichers sowie die Taktfrequenzen von Prozessor und Grafikprozessor. Es besteht damit das Risiko, komplexe Geometrien nur stockend anzeigen zu können, die Nutzerzufriedenheit zu verringern und so die Akzeptanz für das Assistenzsystems zu gefährden. Diese (technische) Herausforderung lässt sich lösen, indem die darzustellenden Geometrien entsprechend vorverarbeitet werden. Weiter besteht das Problem, dass die darzustellenden Geometrien und Zusatzinformationen aufgrund ihres Umfangs schnell unübersichtlich sind und somit wiederum die Nutzerzufriedenheit verringern. Es bedarf daher zusätzlich geeigneter Ansätze zur Visualisierung und Verknüpfung der 2D- und 3D-Inhalte.

#### Vorverarbeitung

Frühe Feldversuche im Rahmen einer studentischen Arbeit (vgl. [Schm20]) bestätigen dies und zeigen im Wesentlichen nur zwei mögliche Lösungen auf: (1) Die anzuzeigenden Modelle werden in ihrer visuellen Komplexität reduziert oder (2) große Teile des Modells werden ausgeblendet und erst bei Bedarf nachgeladen. Befragungen unter potenziellen Anwendern zeigen, dass diese eine geringe

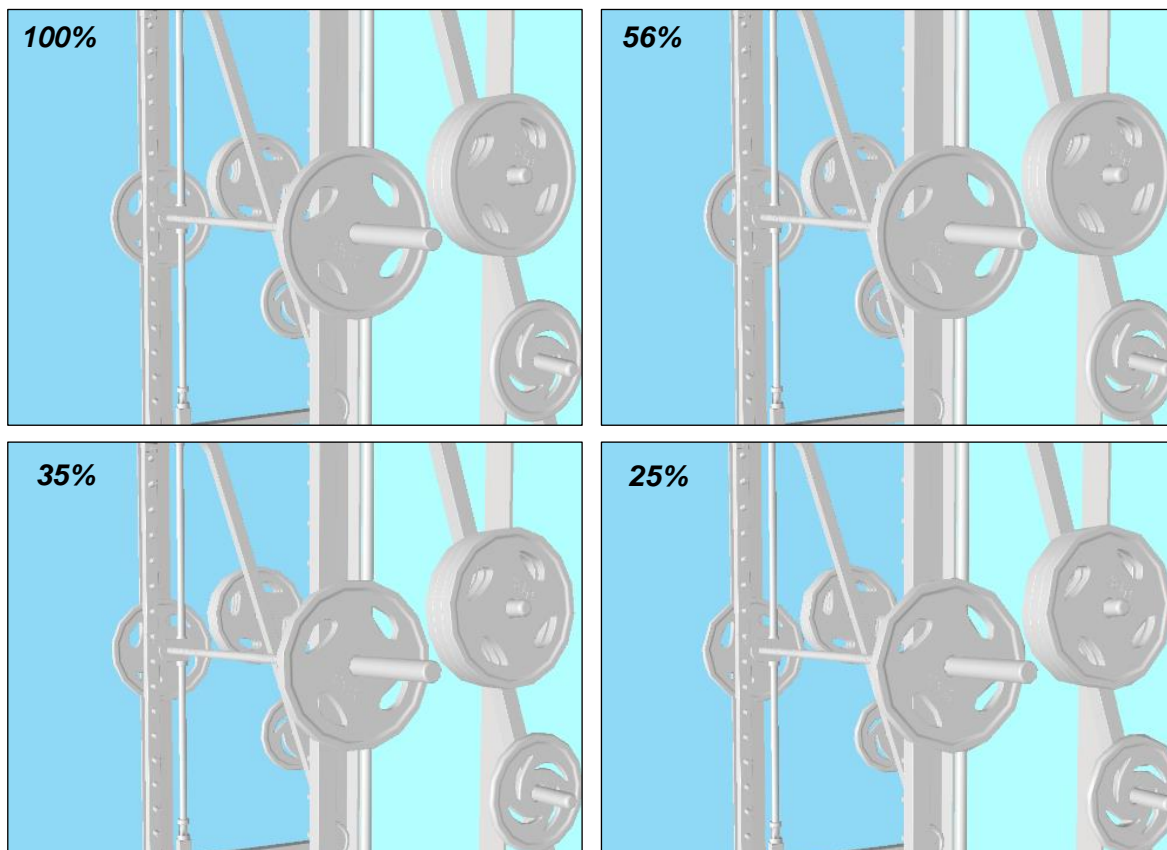
Ladezeit als deutlich wichtiger ansehen als eine hohe Modellqualität (vgl. Abbildung 41). Die geringe Leistungsfähigkeit der Endgeräte sollte daher zunächst durch eine Reduzierung der Modellqualität und (falls notwendig) erst in einem zweiten Schritt durch zusätzliche Laderoutinen kompensiert werden. Methoden wie die inkrementelle Netztriangulation oder die Fast-Quadric-Mesh-Simplification ermöglichen es, die Modelle von 3D-Objekten sehr stark zu vereinfachen, indem sie die Anzahl darzustellender Dreiecke durch geschicktes Zusammenfassen verringern. Eine zu starke Reduzierung führt jedoch dazu, dass sich die Modelldarstellung zunehmend vom realen Objekt unterscheidet, worunter wiederum die Nutzerzufriedenheit leidet.



14388

Abbildung 41: Relevanz von Ladezeit über Modellqualität, nach [Schm20, S. 50]

Die Versuche zur Reduzierung der Modellqualität haben ergeben, dass sich das optische Erscheinungsbild erst ab einem vergleichsweise hohen Reduzierungsgrad überhaupt merklich verändert. Bis zu diesem Punkt sind die Veränderungen kaum wahrnehmbar und die Nutzerzufriedenheit bleibt unberührt. Abbildung 42 zeigt exemplarisch ein 3D-Modell mit der vollen Anzahl von Dreiecken (100%) sowie Stufen, in denen die Dreiecksanzahl auf 56%, auf 35% sowie auf 25% reduziert wurde.



14389

Abbildung 42: Unterschiedliche Modellqualität eines 3D-Modells, 3D-Modell nach [Petr19]

Es fällt auf, dass gerade Konturen nahezu unverändert bleiben, runde Geometrien jedoch eine zunehmend polygonartige Struktur annehmen. In einem ergänzenden Versuch haben potenzielle Anwender die wahrgenommene Modellqualität mittels Schulnoten bewertet (vgl. Abbildung 43), nachdem sie die Anwendung kennengelernt haben.

Die Auswertung zeigt, dass eine Reduzierung auf etwa die Hälfte der Dreiecksanzahl die Bewertung der Modellqualität nicht wesentlich verschlechtert. Erst eine weitere Reduzierung auf 35% der ursprünglichen Dreiecksanzahl führt zu einer merklichen Verschlechterung.

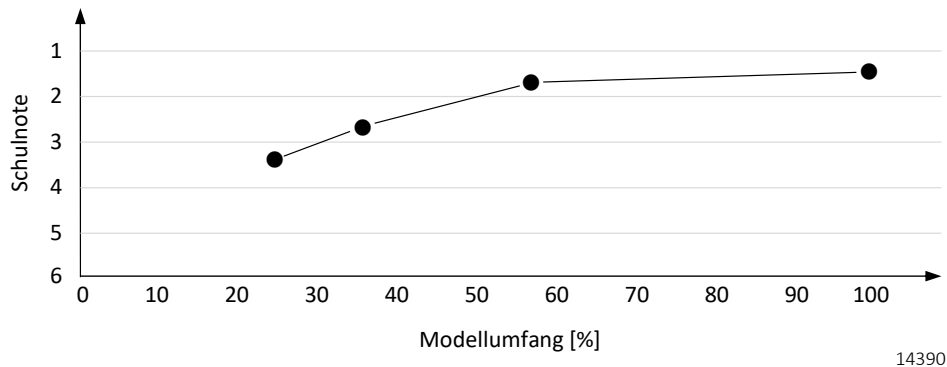


Abbildung 43: Bewertung der Modellqualität, nach [Schm20, S. 56ff.]

Mithilfe dieser Erkenntnisse lässt sich eine effiziente Vorverarbeitung konfigurieren, die Ladezeiten verkürzt, ohne die wahrgenommene Modellqualität zu beeinträchtigen.

### Visualisierung

Neben den beschriebenen Bauteilgeometrien existiert eine Vielzahl weiterer Informationen, die der Werker benötigt. Diese lassen sich grundsätzlich in zwei Kategorien unterteilen:

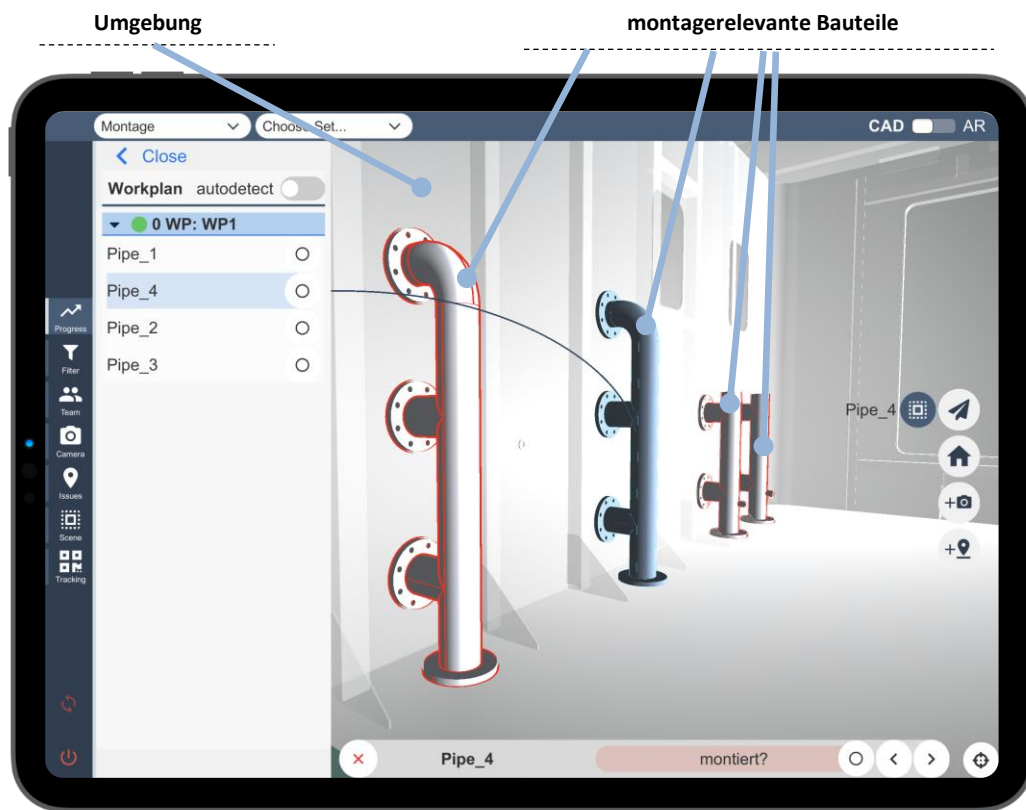
1. **Geometrische Inhalte**, wie das 3D-Modell der zu montierenden Baugruppe, dessen Umgebung oder auch räumlich verortete Inhalte.
2. **Textuelle Inhalte**, wie beispielsweise der Arbeitsplan, Bauteilattribute oder Störungsbeschreibungen.

Halata schlägt zur simultanen Darstellung eines textuellen Arbeitsplans und des zugehörigen 3D-Modells eine getrennte Darstellung von Visualisierungs- (3D-Inhalte) und Ablaufbereich (2D-Inhalte) vor und weist die Tauglichkeit dieses Ansatzes erfolgreich für Werker der schiffbaulichen Sektionsfertigung sowie für die Montage von Schaltschränken nach [Hala18, S. 128].

Zwar unterscheiden sich die anzuzeigenden Inhalte in der Ausrüstungsmontage von denen der Sektionsfertigung. Aufgrund eines sehr ähnlichen Anwenderprofils behalten die grundlegenden Überlegungen Halatas hinsichtlich einer ergonomischen Gestaltung der Benutzeroberfläche jedoch ihre Gültigkeit. So erfolgt die Darstellung weiterer (insbesondere in der Ausrüstungsmontage relevanter) textueller Inhalte analog zum Arbeitsplan im Ablaufbereich (im weiteren Verlauf *Listenbereich* genannt) und die Darstellung sämtlicher Geometrien sowie verorteter Inhalte im Visualisierungsbereich (im weiteren Verlauf *Modellbereich* genannt).

Baugruppen und Bauteile der Ausrüstungsmontage sind deutlich komplexer als z. B. Bauteile der Sektionsfertigung. Es sind deutlich mehr Bauteile im Baubereich angesiedelt, die sich aufgrund des schichtweisen Aufbaus (vgl. Abschnitt 4.1.1) in mehreren Ebenen befinden, teils sehr klein sind und darüber hinaus verschiedensten Gewerken zugeordnet sind. Zwar ließe sich die Modelldarstellung auf die Bauteile eines Arbeitsplans reduzieren, dies würde jedoch dazu führen, dass wesentliche, montagerelevante Anknüpfungspunkte zur Peripherie nicht länger sichtbar sind.

Erprobungen durch Testanwender und Prozessbeobachtungen haben gezeigt, dass Informationen über umgebende Baugruppen insbesondere dazu dienen, mögliche (zukünftige) Bauteilkollisionen zu erkennen und frühzeitig zu klären. Besonders bei der Installation von Kabel- und Rohrdurchführungen kann das Wissen über die Ausmaße und den Verlauf der späteren (von einem anderen Gewerk ausgeführten) Installationen Montagefehlern und somit möglichen Störungen vorbeugen. Als Hilfestellung für den Werker genügt es jedoch, umgebende Baugruppen nur schemenhaft darzustellen (Abbildung 44).



14391

Abbildung 44: Darstellung von montagerelevanten und umgebenden Bauteilen

Die Modellansicht kann so auf die wesentlichen montagerelevanten Bauteile fokussiert und der kognitive Aufwand zur Interpretation gesenkt werden. Weiterhin ermöglicht es die halbtransparente Darstellung der Umgebung, umschließende Baugruppen anzuzeigen, ohne den Blick auf die montagerelevanten Bauteile einzuschränken.

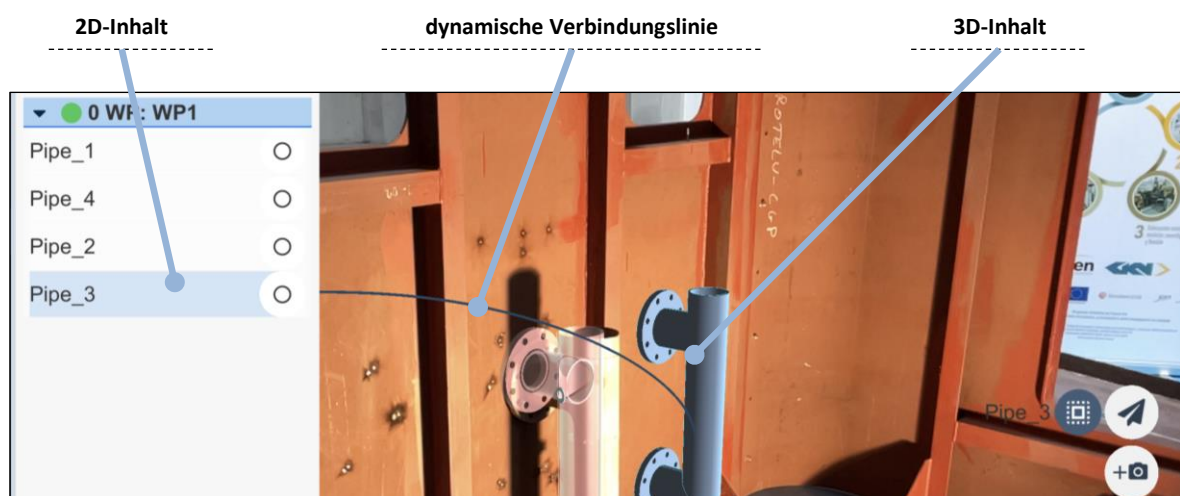
Auch die Verknüpfung von textuellen und geometrischen Inhalten (z. B. ein Arbeitsschritt, der auf eine Bauteilgeometrie verweist) ist für komplexe Modelle schwierig: Farbliche Hervorhebungen (wie sie klassischerweise Anwendung finden) stellen insbesondere bei sehr kleinen Bauteilen aufgrund

der höheren Modellkomplexität keinen ausreichenden Kontrast dar, um dem Anwender den Zusammenhang zu verdeutlichen. Die Interpretation des Modellbereichs ist infolgedessen mit Aufwand verbunden und die Darstellung stünde im Widerspruch zur Anforderung einer intuitiven Informationsaufbereitung (A2-2).

### Verknüpfung von 2D- und 3D-Inhalten

Die strikte Trennung textueller und geometrischer Inhalte ist nach Halata auf eine getrennte Beantwortung ablaufbezogener Fragen des Anwenders zurückzuführen: *Wann und Was* zu montieren ist, wird vom Mitarbeiter zumeist zwischen den Arbeitsschritten, *Wo und Wie* währenddessen geklärt [Hala18, S.63]. Die Tatsache, dass zwischen der Beantwortung der Fragestellungen Zeit verstreicht, verstärkt den zuvor beschriebenen Effekt eines hohen kognitiven Aufwands zur Interpretation der Modelldarstellung bzw. zur Zuordnung von korrespondierenden textuellen und geometrischen Inhalten.

Ein häufiges Problem digitaler Assistenzsysteme ist das Verknüpfen von textuellen und geometrischen Inhalten. Der gedankliche Prozess, um Informationen der unterschiedlichen Darstellungsformen miteinander zu verknüpfen ist kognitiv auf Dauer anstrengend. In Konstruktionszeichnungen wird der Prozess (z. B. bei Verfahrenshinweisen) durch Verbindungslinien zwischen dem betroffenen Bereich auf der Zeichnung und dem textuellen Hinweis unterstützt. Überträgt man diesen Ansatz auf die Darstellung von 3D-Modellen mit digitalen Assistenzsystemen, so führt die Verbindungslinie von einem zweidimensionalen zu einem dreidimensionalen Objekt. Eine geradlinige Verbindungslinie würde zu einer missverständlichen Darstellung führen, da die planare Liniendarstellung im Widerspruch mit der wahrgenommenen, räumlichen Tiefe im Modellbereich steht und ist daher ungeeignet. Als Lösung wurde stattdessen eine auf Basis-Splines basierende Darstellung entwickelt, die zwar den Grundgedanken einer direkten Verbindungslinie aufgreift, jedoch explizit für räumliche Darstellungen geeignet ist: Die Verbindungslinie verläuft in ihrem Ursprung (auf Seite der textuellen Inhalte) geradlinig und folgt im weiteren (räumlichen) Verlauf einer geschwungenen (Basis-Spline-)Bahn, wobei die Linienstärke mit zunehmender räumlicher Distanz abnimmt (Abbildung 45).



14392

Abbildung 45: Verknüpfung von 2D- und 3D-Inhalten

Weil sich das Display des Endgerätes physisch vor den dargestellten Geometrien befindet, entsteht

eine räumlich nachvollziehbare Darstellung und der Anwender kann einzelne, textuelle Inhalte einfach mit dreidimensionalen Objekten in Verbindung bringen.

### 5.3.5 Multimodale Interaktion

Werker der Sektionsfertigung und der Schaltschrankmontage folgen bei der Durchführung einer Montageaufgabe in der Regel einem konkreten, selbstbestimmten Muster: So werden Bauteile beispielsweise häufig gemäß ihrer geometrischen Lage von links nach rechts verbaut [Hala18, S. 66]. Halata unterstützt die Werker, indem der Anwender den dargestellten Arbeitsplan nach geometrischen Randbedingungen sortieren kann. In der Ausrüstungsmontage unterliegt die Entscheidung für das nächste zu verbauende Bauteil nur zum Teil geometrischen Bedingungen. Es hat sich gezeigt, dass beispielsweise die Packreihenfolge der Bauteile in bereitgestellten Transportkisten ein wesentlicher Einflussfaktor auf die Montagereihenfolge ist. Gleiches gilt für die Verfügbarkeit von Werkzeugen oder Hilfsmitteln. Infolgedessen ist zu beobachten, dass erfolgreich installierte Bauteile häufig direkt in den Zusammenbauzeichnungen und nicht in der Stückliste abgestrichen werden. Der Übergang von der räumlichen Montageumgebung zur Zeichnung fällt kognitiv deutlich leichter, als die Sachnummer in einer (für den Anwendungsfall) unsortierten Liste zu suchen.

Die geometrischen Inhalte des Modellbereichs nehmen somit gegenüber den textuellen Inhalten des Listenbereichs zu Interaktionszwecken einen deutlich höheren Stellenwert ein: Das Modell ist nicht mehr nur als ablaufgesteuerte Visualisierung des Arbeitsplans (vgl. [Hala18, S. 76]) zu verstehen, sondern muss vielmehr selbst ein Werkzeug zur Ablaufsteuerung darstellen. Diese Form der multimodalen Interaktion ermöglicht es dem Werker, montierte oder zu montierende Bauteile sowohl über den textuellen Arbeitsplan im Listenbereich als auch über die jeweilige Geometrie im Modellbereich auszuwählen. Auch Informationen zu Störungen oder zur Materialdisposition sind auf das veränderte Nutzungsszenario auszurichten.

Abbildung 46 zeigt die unter Berücksichtigung ergonomischer Aspekte erfolgte Neugestaltung der Benutzeroberfläche: Die Oberfläche teilt sich in einen Listen- und einen Modellbereich: Der Listenbereich stellt den Arbeitsplan und weitere, in Listenform vorliegende Informationen dar, wie beispielsweise Attribute oder Störungsmeldungen. Um dem Anwender ein möglichst komfortables und immersives Arbeiten mit dem Modellbereich zu ermöglichen, lässt sich der Listenbereich ausblenden. Hierfür sind sämtliche (dann ausgeblendeten Inhalte) auch in sinnvoller Form im Modellbereich zu visualisieren. Zu diesem Zweck wurde der Modellbereich um ein abgesetztes Menü (Bauteilzugriff) zur Interaktion mit dem aktuell ausgewählten Bauteil ergänzt. Dieses stellt für das aktuell ausgewählte Bauteil weitere zentralen Informationen dar und ermöglicht es, durch Anklicken der Information (z. B. Lagerfach: 2) die entsprechende Detailansicht (z. B. weitere zugehörige Attribute) im Listenbereich zu öffnen.

Um den Zugriff jederzeit und über verschiedene Menüs zu ermöglichen, muss die Anwendung das aktuell selektierte Bauteil global verwalten und sämtliche Funktionsbereiche über Änderungen der Selektion benachrichtigen. Somit ist es möglich, den Bauteilzugriff über das Auswählen eines konkreten, verknüpften Arbeitsschrittes, einer verknüpften Störungsmeldung, eines verknüpften Attributs oder auch direkt der Bauteilgeometrie zu steuern.

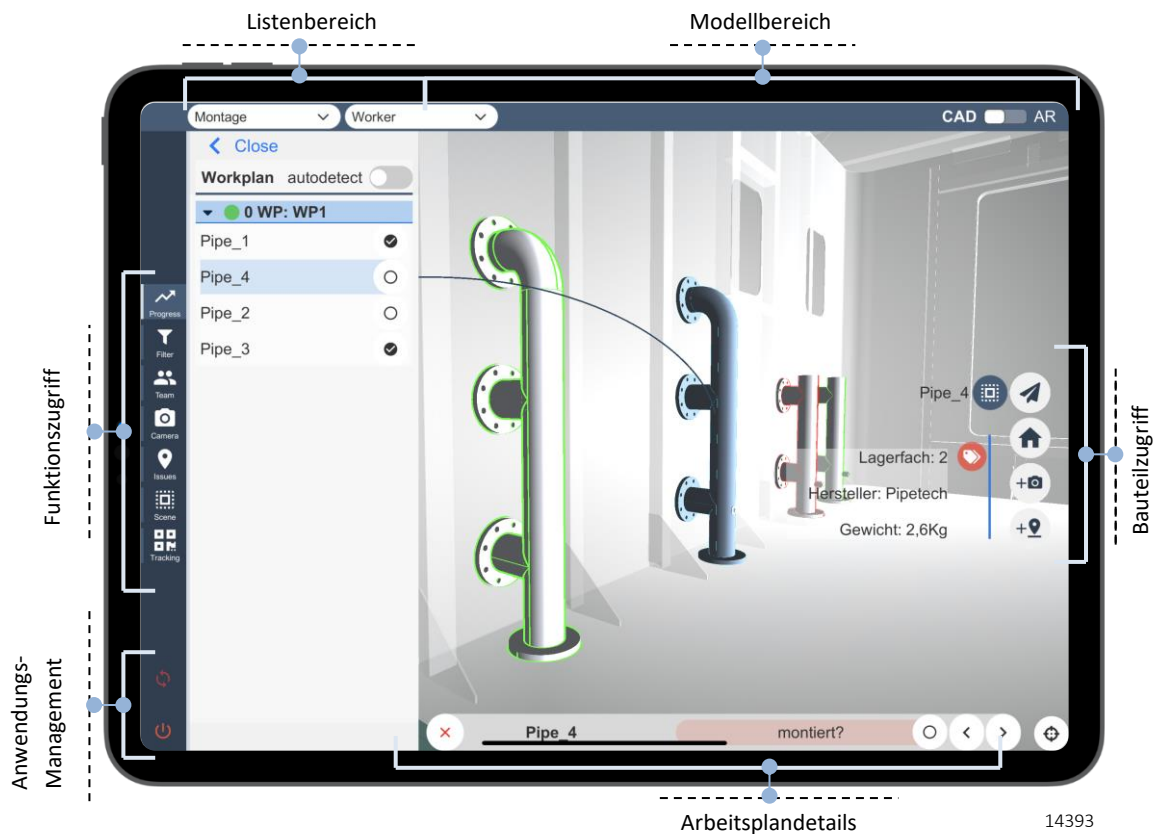


Abbildung 46: Benutzeroberfläche zur multimodalen Interaktion

Die multimodale Interaktion ermöglicht es zum einen, sämtliche Informationen zentral über den Modellbereich (durch Auswählen der interessierenden Bauteilgeometrie) abzurufen. Zum anderen kann der Anwender schnell von einer Information zu einer anderen gelangen. Das Interaktionskonzept zielt insbesondere darauf ab, die Anforderungen hinsichtlich einer kontextbezogenen Informationsdarstellung (Anforderung A2.2 und A3-3) umzusetzen.

Als problematisch hat sich erwiesen, Informationen ausschließlich auf Grundlage ihres konkreten Bauteilbezugs abrufen und darstellen zu können. Eine Analyse realer Störungsfälle zeigte, dass viele Störungen nicht durch die zu montierenden Bauteile selbst entstehen sondern durch Komplikationen im näheren Umfeld des Bauraums.

Ein Lösungsansatz besteht darin, die im Geometriemodell eines Bauteils verankerte räumliche Position auszunutzen, um eine Verbindung zwischen einem Arbeitsschritt und akuten Störfällen in dessen Umgebung herzustellen, wie nachfolgend beschrieben wird.

### 5.3.6 Kontextbezogener Arbeitsplan

Allgemein liefert ein Arbeitsplan alle zur Fertigung einer Sache notwendigen Angaben und beantwortet so die Fragen: Was? Wo? Woraus? Womit? Wie? und Wie lange? [Webe93, S. 29]. In der Einmalfertigung beschränken sich diese Angaben aus wirtschaftlichen Gründen in der Regel auf größere Auftragspakete, z. B. die Montage einer kompletten Baugruppe. Häufig überlassen es Unternehmen den Werkern zu entscheiden, wie im Einzelnen zu verfahren ist und welche Bauteile oder

Unterbaugruppen in welcher Reihenfolge zu montieren sind. Hochberger führt an, dass ein direkter Zusammenhang zwischen der Exaktheit einer Aufgabendefinition und der Fehlerwahrscheinlichkeit besteht [Hohb17, S. 491]. Vor diesem Hintergrund ist der informationsarme Ansatz aus Aufwands-sicht zwar sinnvoll, verursacht jedoch Nacharbeiten durch Produktionsfehler. Das Konzept von Hala-lata löst dieses Problem zum Teil, indem es die einzelnen Stücklistenpositionen zu korrespondierenden Arbeitsschritten wandelt und durch geometrische Beziehungen in eine sinnvolle Reihenfolge bringt. So entsteht ohne manuellen Zusatzaufwand ein detaillierter Arbeitsplan, der es ermöglicht, die Montageaufgabe strukturiert abzuarbeiten.

Wie bereits im vorigen Abschnitt erläutert, unterscheidet sich die Arbeitsweise in der Ausrüstungs-montage von der Sektionsfertigung bzw. dem Schaltschrankbau. Es ergeben sich somit neue Herausforderungen, die es zu lösen gilt:

- Die Montage wird mit einem beliebigen Teil begonnen und das nächste zu montierende Bauteil wird (wenn möglich) auf Grundlage seiner räumlichen Distanz, nicht aber einer globalen Montagerichtung ausgewählt.
- Der Montageablauf wird aufgrund fehlender oder beschädigter Teile im Durchschnitt alle 30 Minuten unterbrochen (Abschnitt 4.2.2).

Die genannten Merkmale führen zu drei wesentlichen Anforderungen:

- Die Steuerung des Arbeitsablaufes muss die multimodale Interaktion unterstützen und somit auch aus dem Modellbereich heraus erfolgen können.
- Die Reihenfolgebildung muss dynamisch auf Grundlage räumlicher Distanzen zu verbauender Bauteile erfolgen.
- Mögliche Störungen im Montageablauf müssen frühzeitig erkennbar sein, um häufige Unterbrechungen zu vermeiden.

### **Multimodale Interaktion mit dem Arbeitsplan**

Für eine Interaktion mit dem Arbeitsplan mithilfe des Modellbereichs bedarf es sowohl bedientech-nischer als auch visualisierungstechnischer Werkzeuge. Damit der Anwender den Arbeitsplan auch bei ausgeblendetem Listenbereich bedienen kann, wird der aktuell ausgewählte, mit einem konkre-ten Bauteil verknüpfte Arbeitsschritt losgelöst an zentraler Position dargestellt (vgl. Abbildung 46, unten rechts). Der Anwender kann sowohl den verknüpften Montagestatus ändern (z. B. auf mon-tiert durch einen Klick auf die rot dargestellte Schaltfläche) als auch zum nächsten oder vorigen Schritt umschalten. Wählt der Anwender im Modellbereich ein konkretes Bauteil aus, so wird auch automatisch der korrespondierende Arbeitsschritt ausgewählt (vgl. Abbildung 38 für die Datenstruk-tur) und so eine multimodale Interaktion ermöglicht.

Das Ausblenden des Listenbereichs (und somit der Gesamtübersicht des Arbeitsfortschritts) erschwert es dem Anwender, die noch zu montierenden Bauteile zu identifizieren und von den bereits montierten abzugrenzen. Deshalb ist es sinnvoll, den Status montierter Bauteile im Modellbereich sichtbar zu machen:

- Montierte Bauteile werden im CAD-Modus grün umrandet dargestellt und im AR-Modus ausgeblendet (bzw. als Maske verwendet → Okklusion), um eine störende Überlagerung im

Kamerabild zu vermeiden.

- Nicht montierte Bauteile werden in beiden Modi rot umrandet dargestellt. Dies ermöglicht es, die ursprüngliche Farbe des Bauteils beizubehalten, da diese häufig im Sinne einer Kodierung z. B. für eine bestimmte Oberflächenbehandlung steht.
- Ist ein Bauteil ausgewählt, wird dieses blau umrandet und alle übrigen Bauteile mit einer Transparenz versehen.

### Reihenfolgebildung und -darstellung

Die Reihenfolgebildung muss im Kern zwei Aufgaben erfüllen: Bei Neubeginn der Montagetätigkeit muss ein geeigneter Startpunkt und bei Fortsetzen der Montagetätigkeit das nächste zu verbauende Bauteil ausgewählt werden. Hierfür sind die Verfügbarkeiten von Materialien und Hilfsmitteln sowie mögliche latente Störungen zu berücksichtigen. Konstruktive Einflüsse auf die Reihenfolgebildung sind dagegen datentechnisch nicht erfassbar und ließen sich allenfalls durch aufwändige manuelle Vorbereitungen berücksichtigen (vgl. Anforderung A2-1). Ferner ist davon auszugehen, dass der Werker auf Grundlage seines Erfahrungswissens in der Lage ist, mit wenig Aufwand eine Entscheidung über den Startpunkt der Montage zu treffen. Um jedoch die weitere Abwicklung der Montage mithilfe des digitalen Assistenzsystems zu ermöglichen, muss dieser Entscheidungsprozess aufwandsarm erfasst und der Startwert im digitalen Arbeitsplan hinterlegt werden. Durch die AR-basierte Darstellung können die Position, die Blickrichtung und auch das aktuell betrachtete Objekt vom Assistenzsystem ermittelt werden (vgl. Abbildung 36). Die automatische Sortierung des Arbeitsplans, begonnen mit dem betrachteten Objekt und fortschreitend mit zunehmend weiter entfernten Bauteilen, führt so zu einer sinnvollen Sortierung für den Beginn des Arbeitsplans.

Für die Auswahl des nächsten zu verbauenden Bauteils ist die bloße Position eines Bauteils (auf Grundlage des 3D-Modells) häufig kein geeignetes Kriterium, um räumliche Distanzen zu berechnen: Betrachtet man beispielsweise einen Rohrstrang, so liegt der Ursprung eines Rohrsegmentes (i. d. R. der Mittelpunkt) häufig weit entfernt vom geometrischen Anfang des Bauteils. Das als nächstes zu verbauende Rohrsegment weist dann eine große Distanz zum gegenwärtigen Bauteil auf. Dadurch entsteht das Risiko, dass die Distanzprüfung fälschlicherweise ein Segment eines parallel verlaufenden Rohrstrangs als nächstes zu verbauendes Bauteil vorschlägt. Das Problem lässt sich lösen, indem nicht einzig die Koordinatenursprünge verglichen, sondern zusätzlich deren Geometrie in Betracht gezogen wird. Als ein praktikabler Ansatz hat sich das randomisierte Prüfen angrenzender Bauteilkonturen an mehreren Punkten auf der Bauteiloberfläche erwiesen. Die nächstangrenzende Geometriekontur stellt dann das wahrscheinlichste Bauteil zur Fortführung der Montagetätigkeit dar.

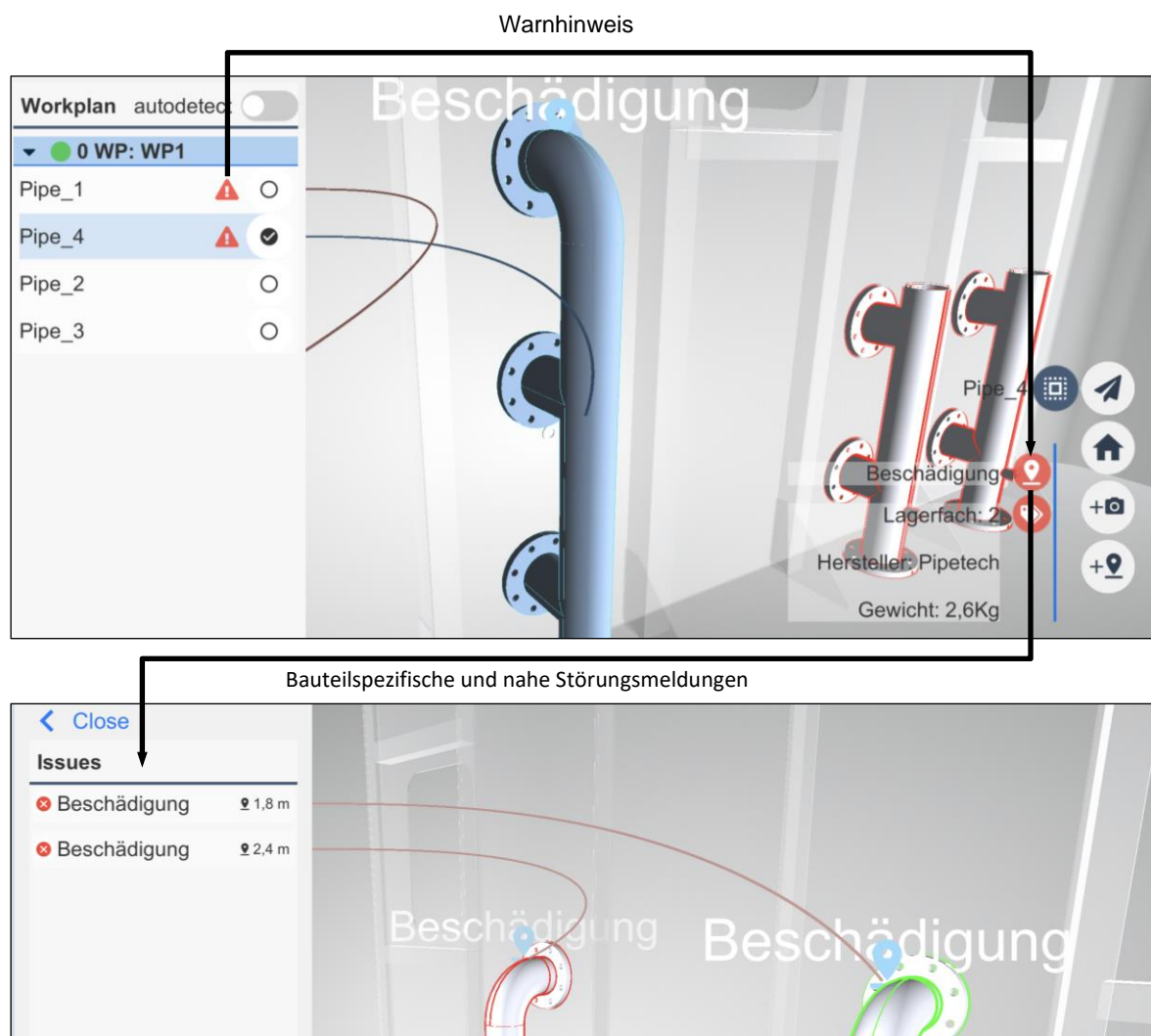
### Verknüpfte Störungsmeldungen

Der Montageablauf wird aufgrund vielfältiger Störungen häufig unterbrochen. Diese Unterbrechungen führen zu kognitiven Aufwänden bei der Wiederaufnahme der Montagetätigkeit oder bewirken sogar, dass ein Montageauftrag gestoppt und erst Tage später fortgesetzt werden kann. Zwar ist es denkbar, dass Störungen erst während der Montage auftreten, eine Vielzahl von Störungen ist jedoch bereits bekannt und wird lediglich inhaltlich nicht korrekt bzw. verspätet kommuniziert. Um spontane Unterbrechungen zu vermeiden, bzw. dem Werker schon zu Arbeitsbeginn ein möglichst genaues Bild über die möglicherweise relevanten Störungen zu geben, ist es notwendig, das Stö-

rungsrisiko der einzelnen Arbeitsschritte zu bewerten und diese mit einem Warnhinweis zu versehen.

Die Störungsanalyse hat ergeben, dass sowohl Störungen der zu montierende Bauteile als auch Störungen in ihrer näheren Umgebung relevant sein können. Letztere führen häufig zu einer Überbelegung des Bauraums mit mehreren Gewerken und somit zu Wartezeiten. Um das Störungsrisiko für einen konkreten Arbeitsschritt zu bewerten, sind daher sowohl Störungen zu berücksichtigen, die direkt das dem Arbeitsschritt zugeordnete Bauteil betreffen, als auch solche, die in der näheren Umgebung auftreten.

Abbildung 47 zeigt die technische Realisierung des kontextbezogenen Arbeitsplans: Arbeitsschritte mit Bezug auf risikobehaftete Bauteile werden mit einem entsprechenden Hinweis (rotes Warndreieck) versehen. Wählt der Anwender den Arbeitsschritt aus, so zeigt der Bauteilzugriff Störungen des Bauteils sowie in der Nähe befindliche Störungen (gemeinsam mit der jeweiligen Entfernung) an. Durch Auswahl der Störungen im Bauteilmenü erhält der Anwender gemäß des Konzepts multimodaler Interaktion unmittelbar Zugriff auf die Detailansicht der Störungen im Listenbereich und kann so eine Entscheidung über den Beginn bzw. Fortgang des Montageauftrags treffen.



14394

Abbildung 47: Kontextbezogener Arbeitsplan

### 5.3.7 Bereitstellung von Zusatzinformationen

Im Produktlebenszyklusmanagement wird zwischen Stammdaten (z. B. Sachnummer) und Strukturdaten unterschieden (vgl. z. B. [Pesc17, S. 53]). Aus Sicht des Werkers spielt diese Zuordnung jedoch keine Rolle. Sowohl Stamm- als auch Strukturdaten sind Merkmale mit einem Bauteilbezug sowie einer bauteilspezifischen Ausprägung und können somit auch als Bauteilattribut verstanden werden:

- Bauteilbezug (Sachnummer): Sechskantschraube1
- Merkmalsbezeichnung: Gewicht
- Merkmalsausprägung: 0,1 kg

In der Praxis zeigt sich, dass Attribute nicht nur technische und dispositive Bauteildaten (häufig ein Produkt der CAD- bzw. ERP-Systeme) umfassen, sondern vielmehr auch zur Speicherung von Notizen und Verfahrenshinweisen für die Produktion Anwendung finden. Die Ursache ist in der einfachen Datenstruktur sowie der damit verbundenen Kompatibilität mit den IT-Systemen zu finden. Die Informationen lassen sich tabellarisch, sozusagen als Erweiterung einer Stückliste, aufbereiten und bereitstellen. Problematisch wird die Verwendung von solchen Stücklistenenerweiterungen als Informationsträger, wenn die Darstellung zu einer nicht handhabbaren Menge von Informationen führt. Werker behelfen sich, indem sie die relevanten Informationen, z. B. mithilfe von Textmarkern, hervorheben. Dies steht in direktem Gegensatz zu einer kontextbezogenen und intuitiven Aufbereitung der Information (Anforderung A2-2) und weist ein hohes Fehlerrisiko auf.

Störungen der Materialversorgung sind eine wesentliche Ursache für störungsbedingte Produktivitätsverluste (vgl. Abschnitt 4.2.2). Ferner hat die Detailanalyse dieses Störungstyps ergeben, dass nicht nur die Summe störungsbedingter Nebenzeiten, sondern insbesondere die Häufigkeit der Störungsauftritte problematisch ist. Ein erheblicher Teil materialbedingter Störungen ist auf veraltete Datensätze oder eine mangelhafte Aufbereitung von Dispositionsattributen (z. B. Lagerort) zurückzuführen. Um das etablierte System der Bauteilattribute für die komplexe Unikatproduktion nutzbar zu machen und hierbei die Anforderungen an eine aktuelle, intuitive und kontextbezogene Aufbereitung zu erfüllen, müssen diese mindestens tagesaktuell bereitgestellt, für den jeweiligen Wirkungsbereich zusammengestellt und bezogen auf die jeweilige Problemstellung aufbereitet werden.

#### Bereitstellung über einen zentralen Server

Ein zentraler Server ist eine geeignete Lösung, um die Daten auf den mobilen Endgeräten möglichst täglich oder sogar noch häufiger aktualisieren zu können: Die Endgeräte bauen in regelmäßigen Zeitabständen eine Verbindung zum Server auf, beziehen aktuelle Daten und übermitteln die auf dem Gerät erzeugte Daten. Für den Fall einer längeren Offline-Nutzung wurde zusätzlich eine Benachrichtigungsfunktion implementiert, die den Werker auf die Gefahr veralteter Datenstände aufmerksam macht.

#### Zusammenstellung von Attributsets

Ein Zielkonflikt erschwert die Zusammenstellung der Attribute: Für eine möglichst gute Übersicht sollten so wenig Attribute wie möglich dargestellt werden. Zur umfassenden Informationsbereitstellung und bestmöglichen Störungsvermeidung jedoch so viele wie möglich. Das Problem lässt sich lösen, indem der Anwender zwischen mehreren vorkonfigurierten Sets von Attributen auswählt

kann. Praxistests haben gezeigt, dass gewerkspezifische Sets von Attributen ein gutes Mittel zur Strukturierung darstellen, da die Informationsbedarfe innerhalb eines Gewerkes zwischen den Anwendern nicht variieren. In einmalig durchgeführten Workshops lassen sich die für einen Aufgabenbereich sinnvollen und häufig genutzten Merkmale meist schnell identifizieren und zusammenstellen. Zudem können zusätzliche Informationen, die über den eigenen Aufgabenbereich hinausgehen, durch die Gewerks-Zuordnung intuitiv abgerufen werden.

### Problemorientierte Informationsfilterung

Die einfache Datenstruktur der Attribute verleitet dazu, sämtliche Attribute des ausgewählten Bauteils als Liste darzustellen. Dies sorgt zwar für eine umfangreiche Informationslage, schafft jedoch für die Materialbeschaffung keinen Mehrwert: Der Anwender müsste sämtliche Bauteile durchschalten, sich das Erscheinungsbild einprägen und händisch eine Strichliste über die jeweiligen Lagerorte führen. Das gleiche Problem tritt bei der Beschaffung benötigter Hilfsmittel oder Zusatzmaterialien auf. Um diesem Problem zu begegnen, bedarf es Filtermöglichkeiten, um Attribute problemorientiert auszuwerten, z. B. konsolidiert als Material- oder Werkzeuglisten. Der Werker benötigt frühzeitig (zu Beginn seiner Arbeitsaufgabe) ein klares Bild über die verfügbaren bzw. noch zu beschaffenden Materialien. Dies ermöglicht eine gruppierte Materialbeschaffung und beugt späteren Unterbrechungen durch erneute Lauf- und Transportwege vor. Grundsätzlich liegen die dafür notwendigen Informationen in Form von Dispositionsattributen (vgl. Abbildung 48, oben) vor, es mangelt jedoch an einfach nutzbaren Funktionen, um die Materialien für eine Aufgabe zu konsolidieren.

Häufig weisen die Merkmalsausprägungen eines Attributs in einer Menge von Bauteilen starke Parallelen auf. Beispielsweise haben mehrere Materialien den gleichen Lagerort oder den gleichen Hersteller. Dies trifft jedoch nicht auf alle Attribute zu: Das Gewicht verschiedener Bauteile ist beispielsweise nur selten identisch und Notizen zu Verfahrenshinweisen sind nur vereinzelt vorzufinden. Klassische und für den Anwender bekannte Filterfunktionen sehen das An- oder Abwählen einzelner Merkmalsausprägungen vor, um die Modelldarstellung zu steuern. Durch die oben genannten Ausprägungsmöglichkeiten für Bauteilattribute ist diese Funktion jedoch nicht immer sinnvoll. Um nicht sinnvolle (und teils verwirrende) Filterungen einzuschränken, ist eine eingeschränkte Nutzung der Merkmale in drei unabhängigen Kategorien sinnvoll (vgl. Abbildung 48, oben).

Die informatorische Darstellung beschränkt sich darauf, das spezifische Attribut in der zentralen Bauteilanzeige darzustellen und stellt den Regelfall dar. Im Beispiel werden für das ausgewählte Bauteil (Pipe 4) die Merkmalsausprägungen der Attribute Gewicht (2,6Kg), Lagerfach (2) und Hersteller (Pipetech) angezeigt. Besonders wichtige Attribute (z. B. Freigabestatus) lassen sich zusätzlich durch Zuweisung der Kategorie *wichtig* hervorheben. Zusätzlich lässt sich jedes Attribut zur Filterung des Modellbereichs freischalten. Über den Listenbereich können so zum einen Bauteile einzelner Merkmalsausprägungen ein- oder ausgeblendet werden. Im Beispiel werden alle Merkmalsausprägungen angezeigt. Möchte man z. B. nur die Teile eines konkreten Herstellers anzeigen, so lassen sich diese über das Auswahlfeld einfach isolieren. Zum anderen erhält der Anwender einen Überblick über die Häufigkeit einer bestimmten Ausprägung. Im Beispiel befinden sich zwei Bauteile in Lagerfach 2 und zwei weitere Bauteile in Lagerfach 7. Über den dargestellten Ansatz erfährt der Werker auf einen Blick, wie viele Komponenten er einem bestimmten Lagerfach zu entnehmen hat. Dies ist insbesondere dann hilfreich, wenn ein Teil der Materialien in einem Handlager bereitgestellt wird und die

Darstellung wie eine Einkaufsliste dazu beiträgt, dass keine Teile vergessen werden und unnötige Laufwege entstehen.

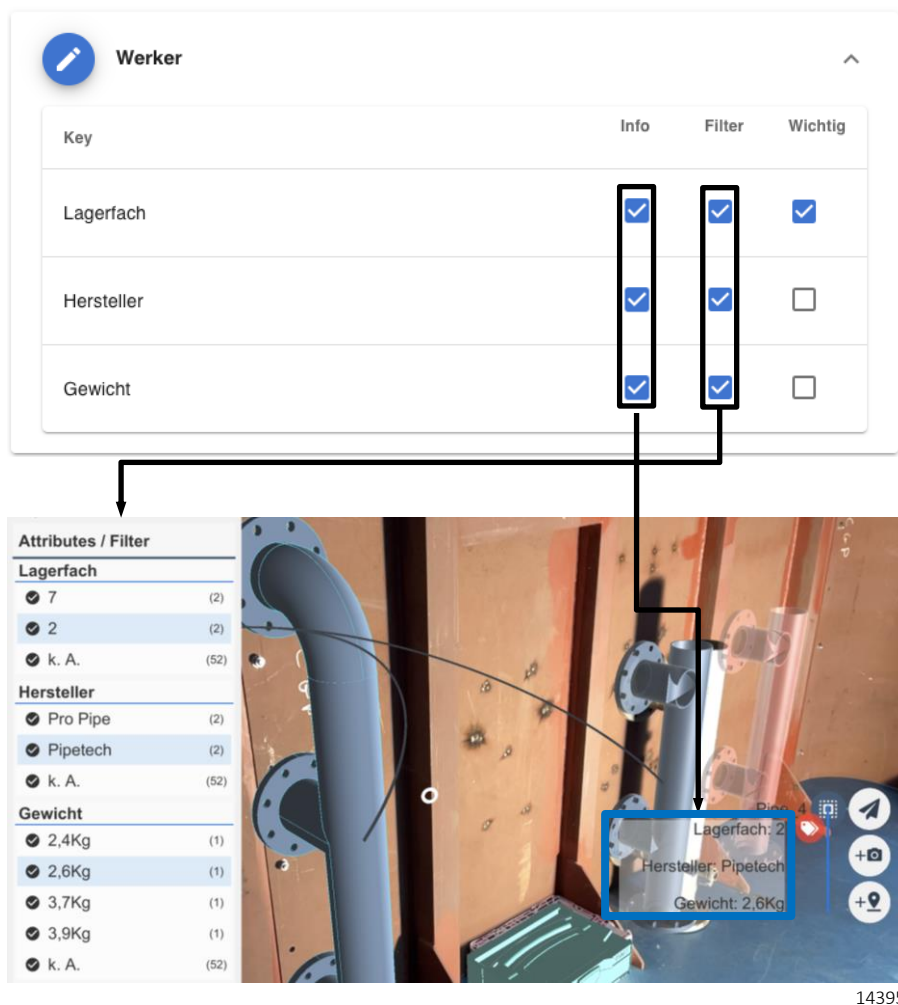


Abbildung 48: Vorkonfiguriertes Attributset und dessen Visualisierung

Wie in Abschnitt 5.2.1 diskutiert, hilft eine so erzeugte Liste benötigter Sachnummern in vielen Anwendungsfällen nur bedingt weiter: In der Praxis befinden sich auf den Bereitstellungsflächen häufig sehr viele Baugruppen. Zwar sind diese mit Begleitdokumenten ausgestattet. Eine Sichtung dieser Dokumente würde jedoch zu hohen Suchaufwänden führen. Das Problem lässt sich lösen, indem die einzelnen Listenpositionen visuell mit dem jeweils betroffenen Bauteil verknüpft (vgl. Abschnitt 5.3.2) werden. Dem Anwender wird so ein Eindruck über das Erscheinungsbild des gesuchten Materials vermittelt, um die Suche zu beschleunigen. Eine Alternative wäre es, die Bereitstellungsfläche zusätzlich in kleinere, eindeutig gekennzeichnete Teilflächen zu unterteilen.

Dieser Abschnitt hat aufgezeigt, wie eine gezielte und konfigurierbare Filterung die Menge bereitgestellter Informationen reduzieren kann. Es kann so mit wenig Aufwand eine aufgabenspezifische Informationssammlung für den Werker zusammengestellt werden. Schreitet dieser in der Abarbeitung des Arbeitsplans voran, bedarf es jedoch ergänzend auch eines Rückkanals zur Meldung des gegenwärtigen Arbeitsfortschrittes.

### 5.3.8 Aufwandsarme Fortschrittmeldung

Wartezeiten nach Abschluss bzw. vor Neuzuteilung einer Arbeitsaufgabe und damit verbundene Bauabnahmeprozesse sind nach materialbedingten Störungen die zweit- und dritthäufigste Ursache für ungewünschte Arbeitsunterbrechungen. Eine wesentliche Ursache hierfür ist die Unterversorgung des Bauleiters mit Rückmeldeinformationen (vgl. Abschnitt 4.2.2). Ist die Montageaufgabe abgeschlossen, wird dies in der Regel unmittelbar dem Bauleiter gemeldet. Bis dieser eine Abnahme der Aufgabe einrichten kann und den entsprechenden Laufweg zurückgelegt hat, entsteht für den Werker eine Wartezeit. Auch die Zuteilung einer neuen Aufgabe (bei erfolgreicher Abnahme) geschieht in diesem Zusammenhang ad-hoc durch den Bauleiter. Dieser benötigt hierfür jedoch häufig weitreichendere Informationen, z. B. über die erfolgreiche Materialanlieferung an der Baustelle, auf die er im mobilen Einsatz (während der Bauabnahme) nicht zugreifen kann. Um dieses Problem zu lösen, muss der Bauleiter die baldige Fertigstellung eines Montageauftrags frühzeitig erkennen. Dies würde es ihm zum einen ermöglichen, die Bauabnahme einzuplanen oder im besten Fall mehrere Bauabnahmen zusammenzufassen. Zum anderen könnte er den nächsten Arbeitsauftrag rechtzeitig sichten und entsprechend vorbereiten, so dass für den Werker keine diesbezügliche Wartezeit mehr entstehen würde.

#### Implizite Baufortschrittmeldung

Die erweiterte Nutzung des zunächst als Checkliste für den Werker konzipierten, kontextbezogenen Arbeitsplans stellt hierfür die Grundlage dar: Durch die häufige Übertragung der vom Werker fertiggestellten Arbeitsschritte im Assistenzsystem ließe sich nicht nur die vollständige Erfüllung des Auftrags, sondern zu jedem Zeitpunkt ein prozentualer Fertigstellungsgrad ermitteln [Hala18 S. 46]. Die Ausnutzung der impliziten Verortung des Fertigstellungsgrades durch die verknüpften Bauteilreferenzen (vgl. Abschnitt 5.2.2) würde zusätzlich eine intuitive Darstellung der Information in verorteter Form ermöglichen: Gemäß ihrer Position ließen sich einzelne Bereiche im interaktiven 2D-Plan einfärben bzw. mehrere Fertigstellungsgrade raum-, zonen- oder decksweise zu übergeordneten Kennzahlen aggregieren.

#### Manuelle Fortschrittmeldung

Solange die Assistenzsysteme nicht durchgängig genutzt werden, sind andere Systeme zur Meldung des Baufortschritts erforderlich, wie z. B. klassische ERP-Systeme bei denen Start- und Endzeitpunkt eines Produktionsauftrags (häufig mittels Barcodes) quittiert werden. Beobachtungen in der Praxis und Gespräche mit verantwortlichen Mitarbeitern im Zuge dieser Arbeit haben gezeigt, dass Fertigmeldungen häufig deutlich verspätet und allgemein nur auf sehr grober Ebene durchgeführt werden. Da insbesondere bei abhängigen Prozessen ein schnelles Melden von Verzögerungen notwendig ist, führt ein unzulängliches Rückmeldeverhalten zu organisatorischen Problemen.

Im Folgenden wird diesbezüglich ein Ansatz zur automatischen Meldung des Baufortschrittes entwickelt, der den Montagezustand von Bauteilen unabhängig vom Arbeitsplan auf Grundlage des CAD-Modells überprüft und dokumentiert. Der Automatismus hat zum einen das Potenzial, den Werker bei der Protokollierung zu unterstützen. Zum anderen können Bauleiter ihn nutzen, um schnell den Fortschritt eines ausgewählten Bereichs zu erfassen.

### Automatische Baufortschrittmeldung

Der Fortschritt eines Montageauftrags lässt sich durch den Anteil bereits montierter Bauteile an der Gesamtheit, der für einen Auftrag zu montierender Bauteile bestimmen. Zur automatischen Bestimmung des Fortschritts ist es daher notwendig, bereits montierte Bauteile in der Umgebung als solche zu erkennen. Diese auch als Soll-/Ist-Abgleich bezeichnete Technik setzt in der Regel 3D-Laserscanner im Bauraum ein, um die Montagesituation zu erfassen und sieht einen anschließenden Abgleich mit dem CAD-Modell vor (vgl. z. B. [Steu21, S. 126]). Dieser Ansatz hat sich in der Praxis für vereinzelte Qualitätsüberprüfungen in ausgewählten Baubereichen zwar bewährt, ist jedoch für baubegleitende, kurzfristige Fortschrittmeldungen durch Werker ungeeignet: Der Einsatz eines 3D-Laserscanners erfordert Fachkenntnisse und ist mit einem hohen Aufwand verbunden. Auch die Nachbearbeitung des Laserscans erfordert Kenntnisse in Spezialsoftware und nimmt viel Zeit in Anspruch. Die Kosten würden den Nutzen des hier skizzierten Anwendungsfalls daher überschreiten. Es bedarf vielmehr eines aufwandsarmen und möglichst echtzeitfähigen Vorgehens, um Soll- und Ist-Zustand miteinander abzugleichen.

Hochwertige mobile Endgeräte sind heute häufig mit der sogenannten LiDAR-Technologie ausgerüstet. Diese erfasst für den Sensor sichtbare Oberflächen und erstellt so eine Topologie der Umgebung (vgl. Abbildung 49 links).

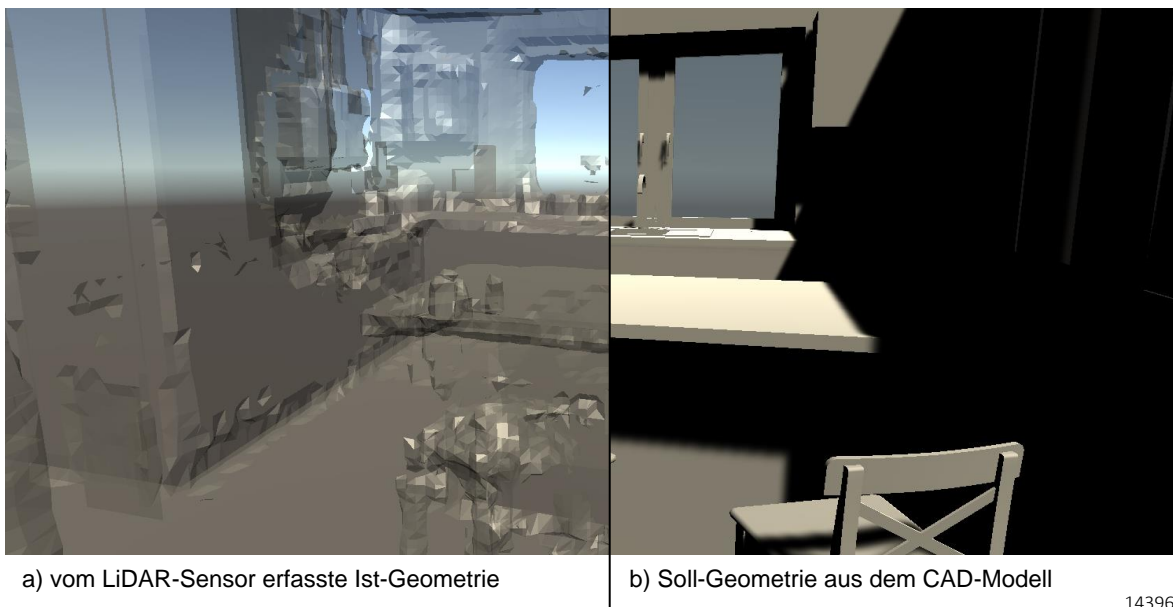


Abbildung 49: Datengrundlage für den prozessbegleitenden Soll- / Ist-Abgleich

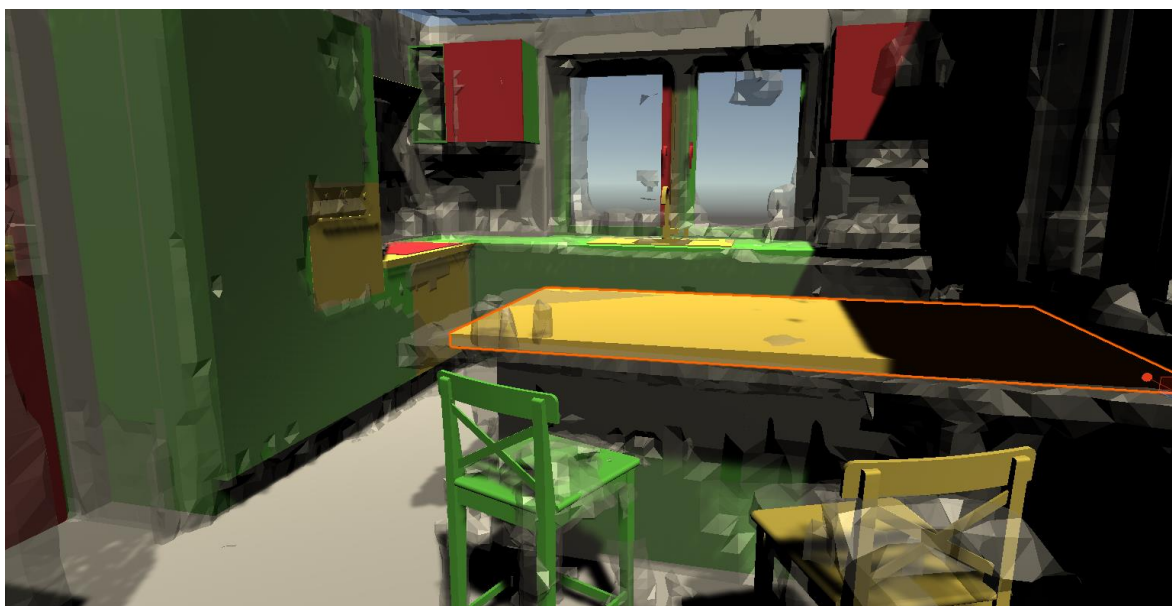
Zwar unterliegt die erfasste Geometrie teils hohen lokalen Ungenauigkeiten, bezogen auf die Gesamtausmaße eines Bauteils bzw. einer Baugruppe sind diese jedoch vernachlässigbar. Die Sollgeometrie wird vom CAD-Modell des Bauraums verkörpert (vgl. Abbildung 49 rechts).

Für konventionelle Ansätze ist es eine wesentliche Herausforderung, Soll- und Ist-Geometrie für den Soll-Ist-Abgleich deckungsgleich zu positionieren. Mit den Trackinginformationen aus dem AR-System liegt die Transformation zwischen Realität und Virtualität bereits in Echtzeit vor, wenn der Anwender im AR-Modus des Assistenzsystems arbeitet.

Konventionelle Methoden für den Soll-Ist-Vergleich berechnen die Distanz korrespondierender Prüfpunkten auf Soll- und Ist-Geometrie und stellen das Ergebnis in Form eines Falschfarbenmodells (rot bedeutet große Abweichung, grün bedeutet geringe Abweichung) dar [Dsub19, S. 32]. Dies ermöglicht es, die Qualität (positionsrichtiger Einbau) zu bewerten.

Für eine schnelle Baufortschrittsmessung ist jedoch lediglich zu prüfen, ob sich ein Bauteil ungefähr an der vorgesehenen Position befindet, so dass der Ansatz vereinfacht werden kann: CAD-Modell und Topologie der realen Umgebung werden dazu mithilfe der Trackinginformationen positionsrichtig übereinandergelegt. Der entwickelte Algorithmus erzeugt anschließend sowohl im CAD-Modell als auch in der realen Topologie eine Gerade durch den Kamera-Ursprung und durch einen zufällig gewählten Testpunkt im Sichtfeld des Betrachters. Schneidet die Gerade im CAD-Modell ein Objekt, so wird dieses in die Liste erwarteter Bauteile aufgenommen. Schneidet die Gerade die reale Topologie, wird die Position des Schnittpunktes erfasst. Der Algorithmus wählt dann das CAD-Objekt mit dem geringsten Abstand zu diesem Punkt aus. Ist der Abstand kleiner als eine Maximaldistanz, erhält das CAD-Objekt eine Sichtungsmeldung. Je Bauteil liefert das Verhältnis aus Bewertungen in den Kategorien *erwartet* und *gesichtet* Aufschluss über den tatsächlichen Montagezustand des Bauteils, wobei die Ergebnisgüte mit fortschreitender Zeit steigt. Abbildung 50 zeigt das Ergebnis einer exemplarischen Baufortschrittsmessung und anschließenden Einfärbung der CAD-Objekte. Im Beispiel wurden drei Schwellwerte definiert: Liegt der Anteil der Sichtungen unter 30%, wird das Bauteil als nicht vorhanden gewertet und rot eingefärbt. Eine gelbe Färbung bedeutet eine Sichtigungsquote zwischen 30% und 70% und eine grüne Färbung besagt, dass mehr als 70% der erwarteten Prüfpunkte tatsächlich gesichtet wurden.

Durch Abgleich der Bewertungen des CAD-Modells mit der Stückliste lassen sich so in Echtzeit Fortschrittsdaten generieren, zur weiteren Verarbeitung an den zentralen Server übermitteln und so dem Bauleiter zur Verfügung stellen.



■ Objekt vorhanden      ■ Objekt vielleicht vorhanden      ■ Objekt nicht vorhanden

14397

Abbildung 50: Ergebnis des prozessbegleitenden Soll- / Ist-Abgleichs

### **Kombinierte Baufortschrittmeldung**

Grundsätzlich bieten die Ansätze Vor- und Nachteile: Die manuelle Fortschrittmeldung ist aufwändig und kann aufgrund dessen nicht auf Einzelteilebene stattfinden. Dies erschwert es, in regelmäßigen Abständen den Zwischenstand eines Montageauftrags abzufragen. Die implizite Fortschrittmeldung schafft hier Abhilfe, funktioniert jedoch nur bei durchgängiger Anwendung von Assistenzsystemen und sofern die Benutzer die digitalen Arbeitspläne konsequent nutzen und die Einbauschritte entsprechend quittieren. Die Erfassung und Meldung des Baufortschritts mit der LiDAR-Technologie und AR-Tracking funktioniert anwenderunabhängig, kann in vielen Fällen jedoch keine definitive Aussage zum Einbaustatus treffen (siehe Abbildung 50, Status gelb).

Zukünftig bietet sich eine Kombination der Ansätze an: Grundsätzlich erfolgt die Meldung implizit durch das Montageassistenzsystem. Der Algorithmus prüft jedoch unabhängig im Hintergrund den Status der relevanten Bauteile und weist den Nutzer im Falle klarer Abweichungen auf diese hin. Ergänzend können Bauleiter in Bereichen, in denen keine Assistenzsysteme zum Einsatz kommen mithilfe des automatischen Systems mit geringem Aufwand eine schnelle Fortschrittserfassung durchführen.

## **5.4 Störungsdokumentation und -kommunikation**

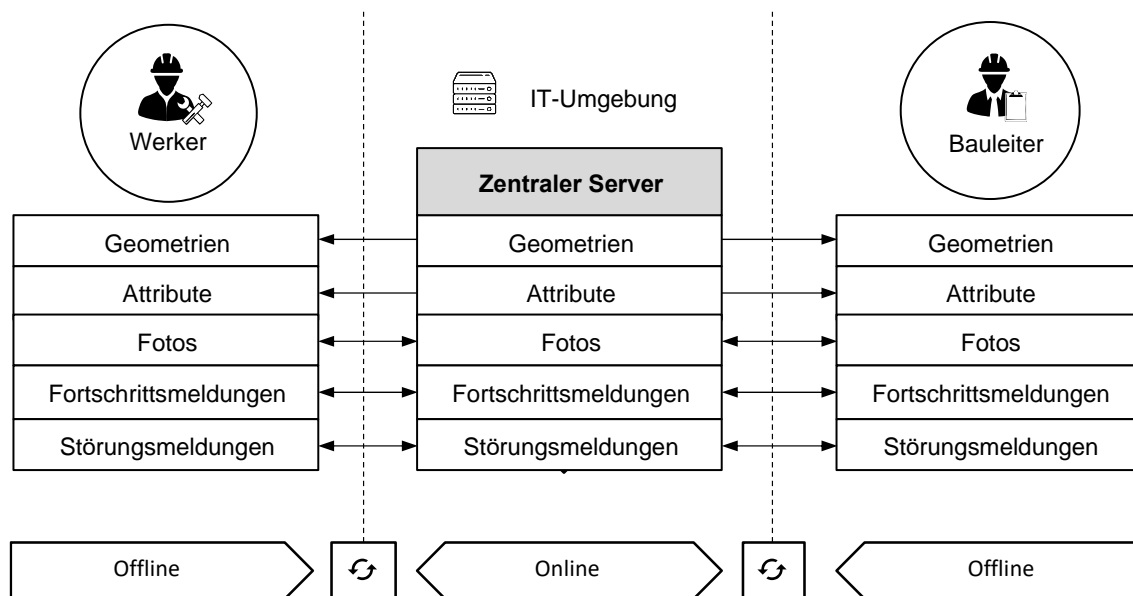
Zwar stellt das entwickelte Assistenzsystem wesentliche Informationen für den Werker situationsgerecht zusammen und kann dadurch einen Teil der Störungen vermeiden. Trotzdem verbleibt ein wesentlicher Störungsanteil. Um eine schnelle Entstörung zu ermöglichen und negative Folgen in abhängigen Produktionsprozessen zu vermeiden, ist es notwendig, Störungen schnellstmöglich zu melden. Allerdings ist dem Störungsmeldenden der Kreis der Betroffenen häufig nicht vollständig bekannt. Wiederum eignet sich das Mittel der verorteten Inhaltsbereitstellung, um unbekanntem Adressaten, z. B. aus anderen Gewerken, einen gezielten Zugriff auf für sie relevante Störungsmeldungen zu erlauben. Hierfür ist zuerst die technische Herausforderung zu lösen, eine geteilte Datenbasis für die Akteure bereitzustellen (Abschnitt 5.4.1). Für eine effiziente Entstörung bedarf es einer schnellen, zumeist bilateralen Kommunikation zwischen Werker und Bauleiter. Um Antwortzeiten und Laufwege zu verkürzen und um Störungen effizient beheben zu können, bedarf es hierzu geeigneter Werkzeuge. Grundlage hierfür ist ein geeignetes Störungsmodell (Abschnitt 5.4.2). Es ermöglicht, Werkzeuge für die aufwandsarme Erstellung von Störungsmeldungen (Abschnitt 5.4.3) und eine kontextbewusste Fotodokumentation (Abschnitt 5.4.4) zu entwickeln. Diese ergänzen das mobile Assistenzsystem für Werker.

### **5.4.1 Datenmanagement**

Störungsmeldungen sind möglichst schnell zu übermitteln und zu verarbeiten, um Betroffene schnell zu informieren und Folgestörungen zu vermeiden. Hierbei gilt: Je schneller die Daten zwischen den unterschiedlichen Akteuren ausgetauscht werden (vgl. Abbildung 51), desto geringer ist das Risiko für Folgestörungen. Um den Austausch zwischen einander unbekanntem Akteuren zu ermöglichen, bedarf es einer zentralen Stelle, die Daten entgegennimmt, verarbeitet und an die relevanten Empfänger weiterleitet. Da sowohl mobile als auch stationäre Anwendungen zur situationsgerechten Informationsbereitstellung eine entsprechende Datenbasis benötigen, bedarf es einer kompatiblen Datenstruktur.

Je nach Arbeitsumgebung kann eine Funkverbindung nicht immer gewährleistet werden. Es ist davon auszugehen, dass die verfügbare Bandbreite (sofern eine Verbindung besteht) starken Schwankungen unterliegt. Die Datenversorgung muss daher eine dezentrale Pufferung der Daten auf mobilen Endgeräten unterstützen. Eine ausschließlich zentral verwaltete und von den Endgeräten ad-hoc angeforderte Datenbasis ist daher nicht praxistauglich. Um die autarke Nutzung der Anwendung auch ohne Netzwerkverbindung zu ermöglichen (Offline-Fähigkeit), ist es notwendig, den relevanten Datensatz herunterzuladen, im Falle von Rückmeldungen lokal zu verändern und zu einem späteren Zeitpunkt wieder an den zentralen Server zu übermitteln.

Abbildung 51 zeigt anhand beispielhafter, in den Anwendungsfällen identifizierter Datensätze, wie ein zentraler Server mit den als Beispiel dargestellten Clientsystemen des Werkers und des Bauleiters (uni- oder auch bidirektional) interagiert, die Datensätze jedoch ebenfalls dezentral gepuffert werden.



14398

Abbildung 51: Datenaustausch in verteilten Systemen

Aufgrund der großen Datenmenge (insbesondere für Geometriedaten) und der schwankenden und teils nur sehr geringen Bandbreiten, würde es zu Wartezeiten führen, den gesamten Datensatz auszutauschen. Segmentiert man die auszutauschenden Daten gemäß Abbildung 52, so bilden sich zwei Gruppen aus:

1. Große Dateien, dessen Aktualisierung problemlos aufgeschoben werden kann (Geometrien, Fotos, Konstruktionsattribute)
2. Dateien, die häufig zu aktualisieren sind, die jedoch nur eine geringe Dateigröße aufweisen (Materialattribute, Fortschrittsmeldungen, Störungsmeldungen)

	<b>Dateigröße</b>	<b>Häufigkeit der Aktualisierung</b>	<b>Relevanz der Aktualisierung</b>
<b>Geometrien</b>	<i>hoch</i>	<i>gering</i>	<i>hoch</i>
<b>Fotos</b>	<i>hoch</i>	<i>hoch</i>	<i>gering</i>
<b>Konstruktionsattribute</b>	<i>mittel</i>	<i>gering</i>	<i>gering</i>
<b>Materialattribute</b>	<i>gering</i>	<i>hoch</i>	<i>hoch</i>
<b>Fortschrittmeldungen</b>	<i>gering</i>	<i>hoch</i>	<i>hoch</i>
<b>Störungsmeldungen</b>	<i>gering</i>	<i>hoch</i>	<i>hoch</i>

14399

Abbildung 52: Gegenüberstellung einzelner Datensegmente

Die Gruppen können so einzeln zwischen dem zentralen Server und einem dezentralen Endgerät abgeglichen und aktualisiert werden. Ist nur eine geringe Bandbreite verfügbar, werden nur die Daten aktualisiert, deren Aktualisierung nicht aufgeschoben werden kann.

#### 5.4.2 Störungsmodellierung

Das Ziel der folgenden Abschnitte ist es, ein einfach zu handhabendes System zum aufwandsarmen Erstellen und Verwalten von informativen Störungsmeldungen zu entwickeln, das zusätzlich passende Werkzeuge zur Entstörung bietet. Um diese Anforderungen zu erfüllen, bedarf es zunächst eines dahingehend optimierten Informationsmodells, das zum einen eine hohe Informationstiefe ermöglicht, zum anderen jedoch mit wenig Aufwand befüllt werden kann.

In der industriellen Praxis ist eine Vielzahl von Modellen für Störungen vorzufinden. Eine Grundvoraussetzung ist jedoch die Vereinbarkeit bzw. Integrierbarkeit in die bestehende Informationshierarchie (vgl. Abschnitt 5.3.1). Das sogenannte BIM-Collaboration-Format (BCF) zeichnet sich durch eine hohe Modularität der möglichen Informationsinhalte aus und ist darüber hinaus in der Praxis des Bauwesens etabliert. Das Format ist bewusst als Erweiterung der bestehenden BIM-Infrastruktur konzipiert und knüpft an die dort befindlichen Entitäten (z. B. Geometrieknoten) an (vgl. [BBCF22]). Neben der Störungsmeldung sieht das Format ergänzende Kommentare zur Diskussion einer Störung zwischen den Beteiligten vor.

Um Störungsmeldungen wie in Abschnitt 5.3.6 beschrieben auf den individuellen Kontext eines Workers oder anderen Akteures im Produktionsprozess beziehen zu können, bedarf es entsprechender Datenfelder zur Weiterverarbeitung bzw. Filterung einer Störungsmeldung.

Abbildung 53 zeigt das für eine aufwandsarme, jedoch informationsreiche Erstellung von Störungsmeldungen (und angehängter Kommentare) entwickelte Informationsmodell. Die allgemeinen, insbesondere der Filterung dienlichen Datenfelder *Ersteller*, *Gewerk*, *Erstellungsdatum* sowie ein optionaler Verweis auf das bearbeitete *Arbeitspaket*, lassen sich hierbei vollautomatisch mithilfe des meldenden Assistenzsystems erfassen. Die *Priorität* (in der Regel alphanumerisch) sowie der *Status* (z. B. offen / geschlossen) werden initial durch Standardwerte vorgegeben, sodass folglich einzig die *Kategorie*, eine *Beschreibung*, ein *Bauteilverweis* sowie optional ergänzende *Fotos* zu erstellen sind. Zur späteren Verarbeitung und Visualisierung der Störung ist zusätzlich (gemäß den Ausführungen in Abschnitt 5.2.1) eine *Verortung* erforderlich.

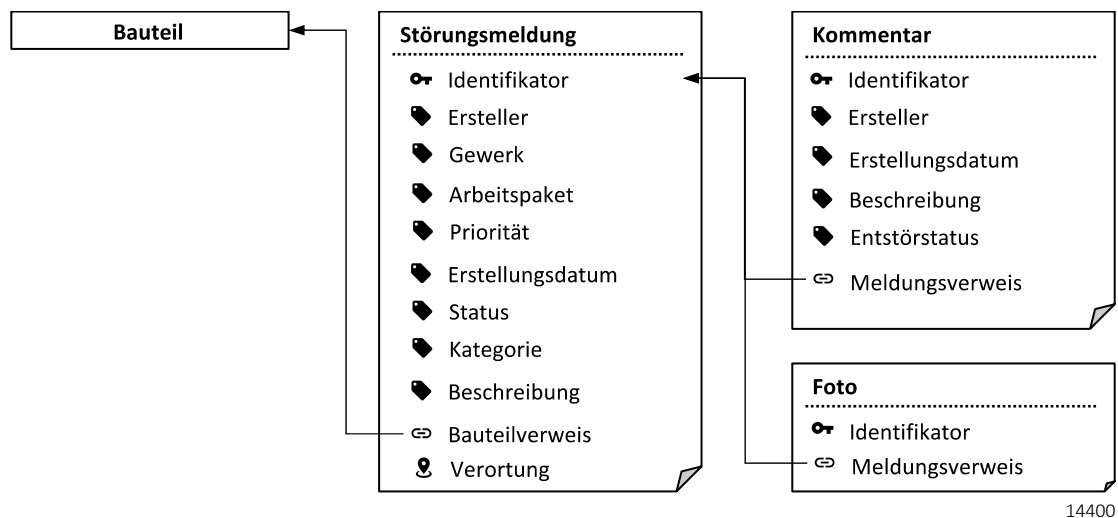


Abbildung 53: Informationsmodell Störung

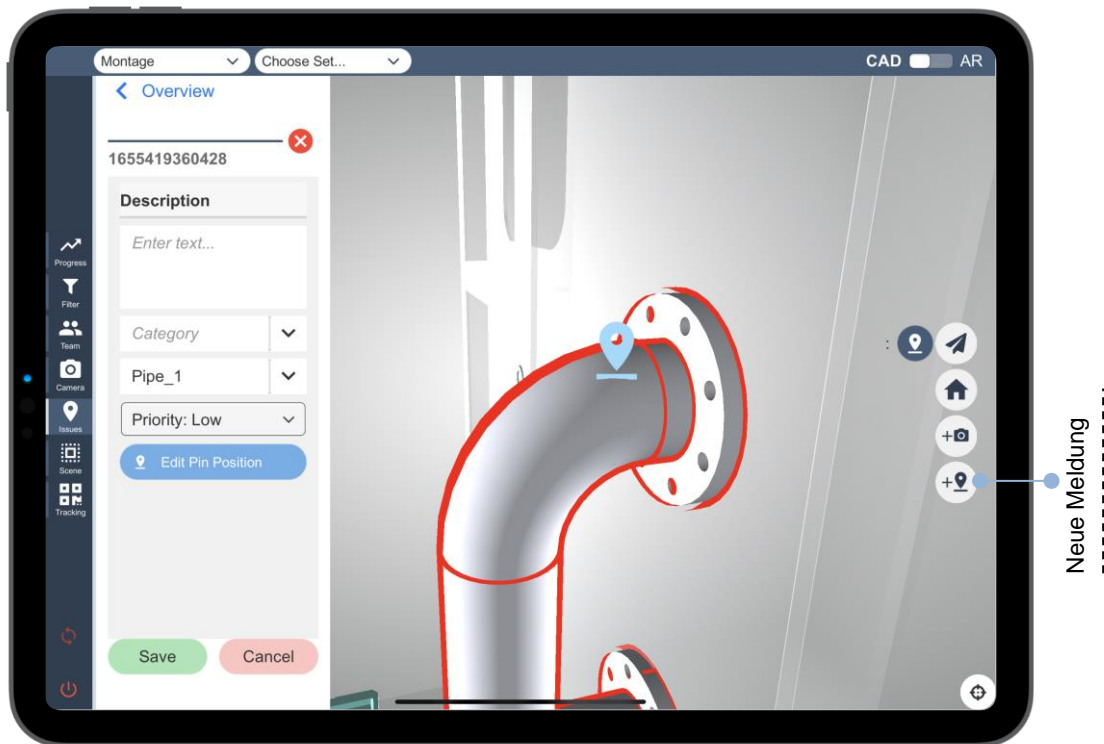
In Anlehnung an das im BCF skizzierte Vorgehen dienen ergänzende Kommentare dazu, sowohl die Historie als auch die explizite Lösung einer gemeldeten Störung zu dokumentieren. Hierbei können Kommentare von allen am Prozess beteiligten Akteuren verfasst werden, wobei sich die Kommentierenden im Wesentlichen auf die Beschreibung konzentrieren und übrige Datenfelder wiederum automatisiert übernommen werden können. Ist eine Lösung gefunden, so wird der zugehörige Kommentar markiert und der Status der Störung geändert. Das Vorgehen findet in ähnlicher Form bereits seit einigen Jahren erfolgreich Anwendung in verschiedenen Internetforen und gewährleistet, dass jeder Betroffene einer Störung unmittelbar die zugehörige Lösung findet, ohne vorangehende Diskussionen sichten zu müssen. Zudem stellt der Ansatz eine lückenlose Dokumentation des zugehörigen Lösungsweges zu einer gemeldeten Störung sicher. Der folgende Abschnitt beschreibt das Vorgehen zur Erstellung einer derartigen Störungsmeldung.

### 5.4.3 Aufwandsarme Störungsmeldung

Es besteht eine Vielzahl möglicher Ursachen für eine Störung: Unklarheiten hinsichtlich der Konstruktion, fehlendes oder beschädigtes Material, fehlende Vorarbeiten oder Probleme mit der unmittelbaren Umgebung sind die geläufigsten Beispiele. Da der tatsächliche Entscheidungsträger zur Lösung der Störung für den Meldenden häufig nicht bekannt ist, sieht der konventionelle Prozess den Erstkontakt zum jeweiligen Bauleiter vor. Telefonate, Messenger- oder E-Mailverkehr führen bei erfolgloser Kontaktaufnahme zu Wartezeiten oder Laufwegen. Um das Problem zu lösen, ist es notwendig, die initiale Kontaktaufnahme bzw. das Melden der Störung von der gegenwärtigen Verfügbarkeit des Bauleiters zu entkoppeln und so auch im Falle längerer Abwesenheit eine schnelle Bewältigung der Störung zu ermöglichen.

Ein zentraler, digitaler Pool, in welchem aufkommende Störungen gesammelt und anschließend von entsprechenden Entscheidungsträgern bearbeitet werden, löst dieses Problem. Um den Ansatz jedoch insbesondere für Werker effizient nutzbar zu machen, wurde das mobile Assistenzsystem um Werkzeuge zum Melden bzw. Anzeigen von neuen Störungen erweitert.

Eine eigene Schaltfläche im Bauteilschnellzugriff (vgl. Abbildung 54) ermöglicht es, jederzeit eine neue Meldung anzulegen.

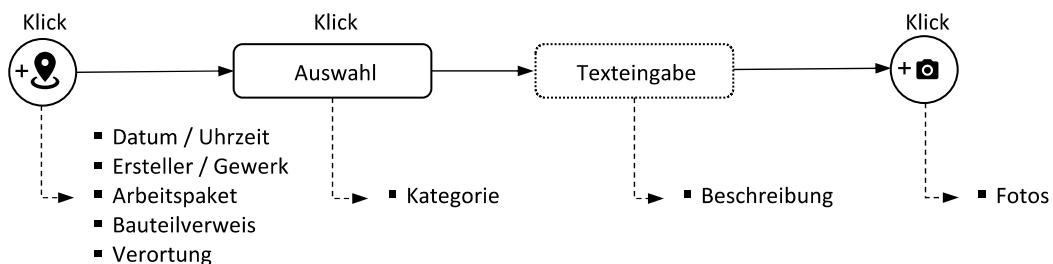


14401

Abbildung 54: Technische Umsetzung von Störungsmeldungen durch einen Werker

Mithilfe des in Abschnitt 5.2.2 konzipierten Ansatzes zum Erstellen verorteter Inhalte erfasst der Werker mit Betätigung der Schaltfläche das aktuell fokussierte Bauteil sowie die konkrete Position (Verortung) auf der Bauteiloberfläche. Sowohl Bauteil als auch Position werden in der neuen Störungsmeldung automatisch hinterlegt. Gleiches gilt für den Ersteller, dessen Gewerk, das aktuell bearbeitete Arbeitspaket sowie Datum und Uhrzeit der Erstellung. Der Werker gibt lediglich eine Störungskategorie sowie eine Beschreibung ein. Erste Praxisversuche haben ergeben, dass Detailbeschreibungen nur selten erforderlich sind, da zumeist die Kategorie für sich aussagekräftig genug ist. Dies gilt insbesondere, wenn die Meldung durch entsprechende Fotos ergänzt wird.

Die Eingabe einer informativen Störungsmeldung vereinfacht sich für den Werker so im besten Fall auf zwei notwendige Klicks (vgl. Abbildung 55): Das Initiieren einer neuen Meldung sowie das Auswählen einer passenden Kategorie. Fotos können ergänzend oder auch anstelle von Texteingaben detaillierte Informationen zu der Störung liefern.



14402

Abbildung 55: Vereinfachter Meldeprozess

#### 5.4.4 Kontextsensitive Fotodokumentation

Fotos sind eines der wichtigsten Kommunikationsinstrumente in der industriellen Praxis. Häufig wird anstatt einer E-Mail oder eines Telefonanrufes ein Bild mittels Messenger versendet, in der Hoffnung, dass der Empfänger das Foto einordnen kann und mit einer entsprechenden Lösung antwortet. Der Ansatz scheint zunächst zwar zielführend, weist aber wesentliche Defizite auf:

- Die Verwendung einschlägiger Messenger wird zwar geduldet, widerspricht häufig aber den geltenden Datenschutz- und Geheimhaltungsbestimmungen.
- Der Empfänger muss bekannt bzw. Mitglied einer zur Problemlösung dienlichen Messenger-Gruppe sein.
- Insbesondere in großen Baubereichen mit vielen Beteiligten führt der Ansatz zu einer zunehmend unübersichtlich werdenden Anzahl ausgetauschter Bilder.
- Lösungen zu konkreten Problemen helfen zwar kurzfristig, lassen aber keine Weiterverfolgung durch indirekt betroffene Akteure zu.
- Es findet keine strukturierte Dokumentation von Störungen und ihren Entstörungsmaßnahmen zum Zwecke einer kontinuierlichen Verbesserung statt.

Das sogenannte Exchangable Image File Format (EXIF) ist ein Datenformat, um Fotos mit Metainformationen anzureichern: Mit dem Smartphone aufgenommene Bilder werden so beispielsweise automatisch mit einem Zeitstempel und Geoinformationen versehen und können in entsprechenden Bildergalerien übersichtlich strukturiert werden. Auch bieten cloudbasierte Galerien einschlägiger Hersteller (Google, Apple, Facebook, Amazon) erweiterte, nachgelagerte Bildanalysen, die beispielsweise Personen oder Objekte innerhalb von Fotos erkennen und so automatisiert eine noch detailliertere Sortierung der Bilder ermöglichen.

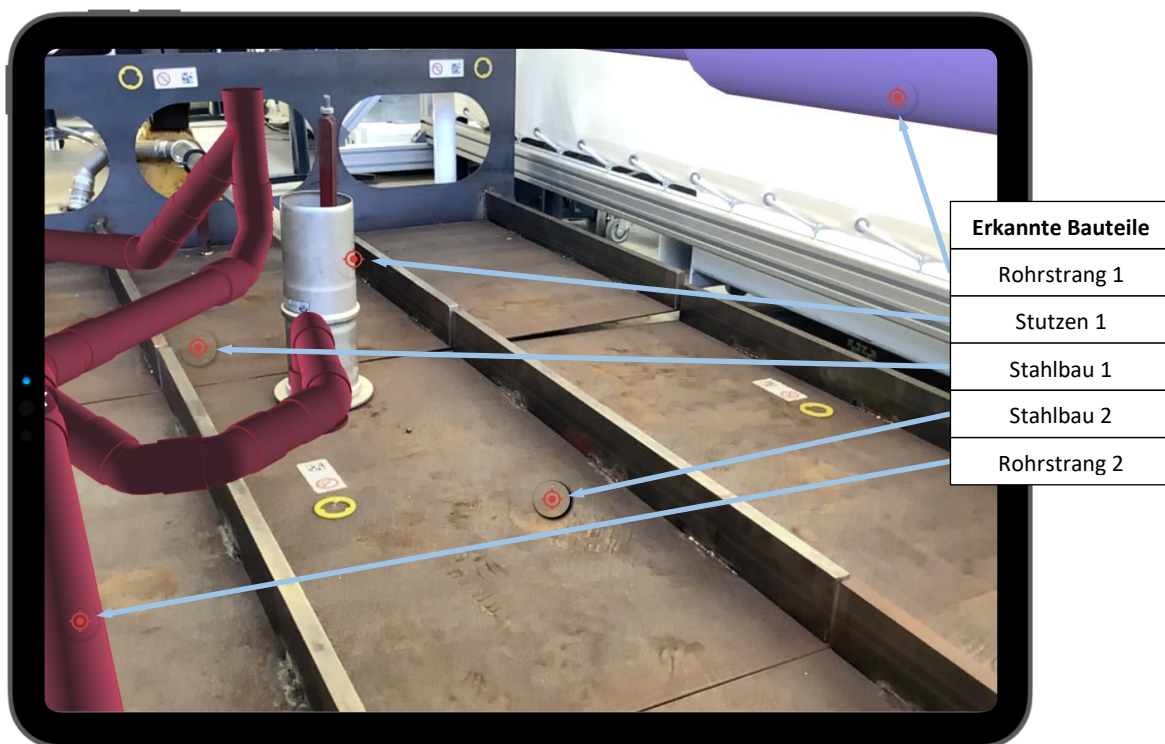
Für den Einsatz im industriellen Umfeld ergeben sich jedoch erhebliche Schwierigkeiten: Z. B. sind GPS-basierte Geoinformationen nicht ausreichend genau und für den Konsumentenmarkt konzipierte Objekterkennungsverfahren sind für haushaltsübliche Objekte und nicht für technische Baugruppen und Bauteile konfiguriert.

Zur Lösung dieser Defizite wurde das mobile Assistenzsystem um eine kontextsensitive Funktion zur Fotodokumentation erweitert. Grundlage der Funktionalität ist wiederum der in Abschnitt 5.2.2 vorgestellte Ansatz, verortete Inhalte mit AR-Unterstützung zu erstellen. Betätigt der Anwender die Schaltfläche zur Aufnahme eines Fotos, werden automatisch das aktuell fokussierte Bauteil, sowie alle weiteren im Sichtbereich befindlichen (virtuellen) Bauteile erfasst: An zufälligen Positionen auf der Benutzeroberfläche werden hierzu orthogonale Geraden gebildet und deren Schnittpunkte mit virtuellen Bauteil-Geometrien ausgewertet. Aus der Menge aller Schnittpunkte wird je Bauteil der auf den Bildausschnitt bezogene Flächenmittelpunkt der jeweiligen Schnittpunktmenge bestimmt und gemeinsam mit dem Bauteilnamen als Attribut an das Foto geknüpft. Als Resultat liegt eine Liste aller auf dem Foto befindlichen Bauteile nebst zugehörigen, auf das Foto bezogenen Koordinaten vor (vgl. Abbildung 56).

Das System speichert zusätzlich automatisch den aktuell ausgewählten Arbeitsplan, das aktuell ausgewählte Bauteil im Arbeitsplan sowie (sofern verfügbar) die aktuell bearbeitete bzw. erstellte Störungsmeldung. Die so automatisch attribuierten Fotos lassen sich nun automatisch entsprechenden

Störungsmeldungen, konkreten Teilschritten des Arbeitsplans, konkreten Räumen oder Sachnummern zuordnen.

Sämtliche Fotos werden in einer projektbezogenen Sammlung gespeichert und nur über einen Verweis mit einer Störungsmeldung verknüpft. Die Fotos können so auch unabhängig von einer Störung durchsucht oder für Dokumentationen verwendet werden. Aufgrund der vollautomatischen Attributierung erstellter Fotos ist es nicht notwendig, die Schaltfläche zum Erstellen neuer Fotos einer konkreten Funktionalität (z. B. Störungsmeldung oder Arbeitsplan) zuzuordnen. Anwender können die Funktionalität nutzen, ohne sich Gedanken über eine aufwändige manuelle Sortierung und Zuordnung machen zu müssen. Um die unabhängige und einfache Nutzung der kontextsensitiven Fotodokumentation zu unterstützen, wurde die Schaltfläche zum Erstellen neuer Fotos ebenfalls im zentralen Schnellzugriffsmenü platziert (vgl. Abbildung 54).



14403

Abbildung 56: Automatische Objekterkennung

Durch die Nutzung bildverarbeitender Verfahren ließe sich die Meldungserstellung aus Abbildung 55 weiter vereinfachen: Wiedmeyer und Jahn haben hierzu ein Verfahren entwickelt, das die Kategorie sowie Beschreibung einer Störung einzig auf Grundlage eines ergänzten Fotos ermittelt [Wied19, S. 64ff.], [Jahn20b, F. 8].

Ist eine Meldung erfolgreich erstellt, muss diese an den Entscheidungsträger (bzw. zunächst an den Bauleiter) kommuniziert und entsprechend gelöst werden. Um Medienbrüche zu vermeiden und das Potenzial schneller, digitaler Datenkommunikation auszunutzen, bedarf es auch auf Seite des Bauleiters eines entsprechenden Assistenzsystems.

## 5.5 Kollaborative Lösungsfindung

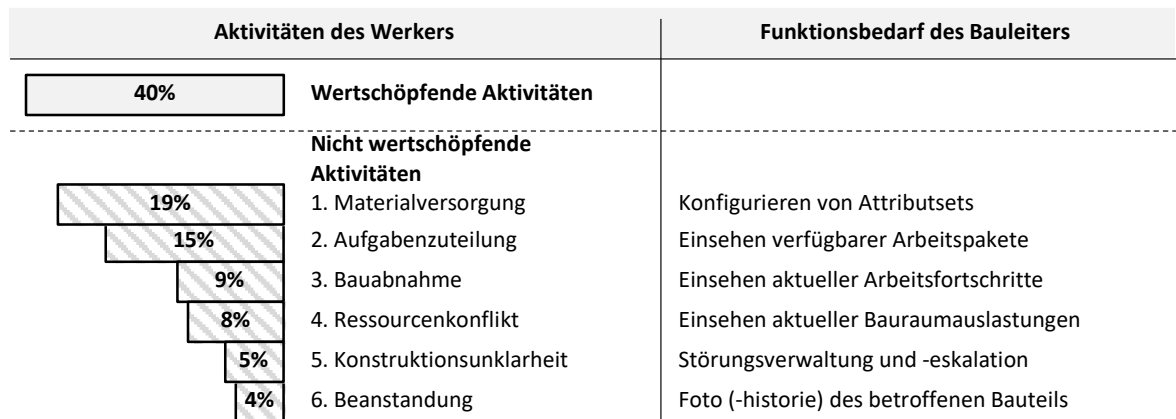
Im vorigen Abschnitt wurde ausgeführt, wie Störungen aufwandsarm von Werkern dokumentiert werden können. Grundlage dafür ist das Werkerassistenzsystem. Eine hybrides Assistenzsystem für Bauleiter (Abschnitt 5.5.1) greift die Störungsmeldungen auf und stellt zugleich Werkzeuge zur Auswertung von Informationen aus dem Bauraum in Echtzeit (Abschnitt 5.5.2) sowie zur Entstörung (Abschnitt 5.5.3) bereit. Auf Grundlage einer automatisierten Vorverarbeitung (Abschnitt 5.5.4) und Sichtung (Abschnitt 5.5.5) der Störungsmeldungen kann der Bauleiter auf Werkzeuge zur zeitversetzten (Abschnitt 5.5.6) sowie Echtzeit-Entstörung (Abschnitt 5.5.7) zurückgreifen.

### 5.5.1 Grundlagen des hybriden Assistenzsystems für Bauleiter

Anders als bei der Montage selbst handelt es sich bei ihrer Koordination überwiegend um ein planares Problem, da die dritte Dimension bei der Betrachtung von Bauraumbelegungen, der überschlägigen Betrachtung von Baufortschritten oder gemeldeten Störungen in aller Regel nur eine untergeordnete Rolle spielt. Auf Werften sind Generalpläne (in analoger oder digitaler Form) daher nicht ohne Grund das zentrale Medium zur Steuerung der Produktionsabläufe.

Anders als Werker bewegen sich Bauleiter zumeist sternförmig, ausgehend von einem festen Arbeitsplatz im Zentrum des Baubereichs zu großen Zeitanteilen frei auf der Baustelle (vgl. Abschnitt 4.1.2). Auch der Bauleiter benötigt daher eine mobile Lösung. Viele koordinative Aufgaben erledigt er jedoch an stationären Rechnern, insbesondere wenn er zusätzliche Informationen aus Unterlagen oder Drittsystemen benötigt. Zusätzlich bieten die stationären Rechner bei umfangreicheren Texteingaben Vorteile in der Bedienung mit Maus und Tastatur. Eine Lösungsvariante ist die Bereitstellung von zwei getrennten Assistenzsystemen: Ein stationäres zur Durchführung planungsintensiver Tätigkeiten und ein mobiles zur dezentralen Steuerung. Eine Alternative dazu ist die Entwicklung eines hybriden Assistenzsystems. Dies bietet den Vorteil eines flüssigen Übergangs zwischen den beiden Nutzungsszenarien: Ein Bauleiter kann das mobile Assistenzsystem am stationären Arbeitsplatz mittels Dockingstation in eine desktopähnliche Arbeitsumgebung wandeln und andersherum. Es sind keine Synchronisationsvorgänge notwendig und die Bedienung erfordert keinen Kontextwechsel. Aufgrund der niedrigen zu erwartenden Entwicklungsaufwände und der üblicherweise hohen Benutzerfreundlichkeit wurde dieser Ansatz mithilfe einer Web-Anwendung umgesetzt, die sowohl auf dem Desktop als auch auf mobilen Endgeräten läuft. Das primäre Ziel des Bauleiter-Assistenzsystems ist es, bei der Lösung von Prozessstörungen zu unterstützen und die damit verbundenen Wartezeiten und Laufwege (auch für die Werker) zu reduzieren bzw. vollständig zu vermeiden.

Aus den Störungskategorien (Abbildung 20) und der Entwicklung des mobilen Assistenzsystems für Werker lässt sich der Informationsbedarf des Bauleiters zur effizienten Störungsbehebung ableiten (vgl. Abbildung 57). Um den Werkern gezielt Zusatzinformationen in Form von Attributen bereitstellen zu können, sind entsprechende Attributsets zu konfigurieren. Das Konzept und die technische Umsetzung einer entsprechenden Funktion wurden in Abschnitt 5.3.7 bereits erläutert. Um bevorstehende Bauabnahmen und daraus folgende Aufgabenzuteilungen frühzeitig erkennen zu können, benötigt der Bauleiter einen aktuellen Überblick über die Arbeitsfortschritte im Bauraum und über die geplanten Arbeitspakete. Weiterhin sind für die Aufgabenzuteilung geeignete Werkzeuge zu konzipieren.



14404

Abbildung 57: Informationsbedarf eines Bauleiters

Um bei der Zuteilung von vornherein die Gefahr von Bauraumüberbelegungen zu vermeiden, ist es ergänzend notwendig, die aktuelle Auslastung des Bauraums zu visualisieren, wobei hier zu bedenken ist, dass die Ist-Auslastung signifikant von der Plan-Auslastung abweichen kann. Zwar zielt die erweiterte, CAD-gestützte Darstellung von Bauteil-Geometrien im Assistenzsystem für Werker darauf ab, Unklarheiten über den technischen Aufbau von Baugruppen und deren Integration in die Umgebung zu vermeiden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass nicht alle Konstruktionsunklarheiten (z. B. auch Konstruktionsfehler) hiervon abgedeckt sind. Es werden daher Funktionen benötigt, um verbleibende Konstruktionsunklarheiten und andere Störungen zu verwalten, zu lösen und zu eskalieren.

### 5.5.2 Aufgabenzuordnung auf Grundlage von Echtzeitinformationen

Die grobe Planung der zu erledigenden Arbeiten wird von indirekten Bereichen durchgeführt. Insbesondere in Bereichen mit geringer Fertigungstiefe ist die Planung zumeist ein mehrstufiger, unternehmensübergreifender Prozess. Zwar hängt die Planungstiefe stark vom Unternehmen und der Branche ab, jedoch konnte bei zahlreichen Prozessbegleitungen in direkten und indirekten Bereichen festgestellt werden, dass ein Montageauftrag in der Regel eine oder mehrere Baugruppen (nicht heruntergebrochen auf Einzelteile) umfasst und diese raumweise, jedoch Gewerke übergreifend rückwärtsterminiert werden. Der Bauleiter wählt bei der operativen Steuerung des Ablaufs aus dem (raumweisen) Bestand freigegebener Montageaufträge aus, bricht diese nach Bedarf weiter in Teilaufgaben herunter, weist sie qualifizierten Werkern zu und trägt schließlich dafür Sorge, dass sie fristgerecht fertiggestellt werden. Die Auswahl eines Auftrags hängt davon ab, ob das notwendige Material verfügbar ist, die konstruktiven Randbedingungen erfüllt sind und ob der Bauraum für die Zeitdauer des Auftrags frei ist.

Konstruktive Randbedingungen sind hierbei durch entsprechende Vorgänger- / Nachfolgerbeziehungen im Projektplan hinterlegt, sodass der Bauleiter die Durchführbarkeit eines Arbeitspakets im Wesentlichen anhand folgender Informationen bewertet:

- Materialverfügbarkeit
- Fertigstellungsgrad des Vorgängers
- Geplante und aktuelle Aktivitäten im Baubereich

Derzeit werden die Informationen entweder konkreten Rückmeldedaten entnommen oder durch Beobachtungen oder Gespräche eingeholt. Rückmeldungen beziehen sich jedoch zumeist auf den gesamten Montageauftrag, was insbesondere bei sehr umfangreichen (bzw. große Areale umfassenden) Aufträgen zu Problemen führt, da ein nicht fertiggestellter Vorgänger nicht immer den Beginn eines nachfolgenden Arbeitspakets ausschließt. Befasst sich ein Montageauftrag z. B. mit dem Montieren der Fußbodenstruktur, so kann in den bereits fertiggestellten Bereichen der nachfolgende Auftrag zur Montage eines darauf stehenden Bühnensystems bereits frühzeitig beginnen. Der Ansatz begünstigt die eingangs erörterte Strategie, Arbeitsgänge zu parallelisieren (vgl. Abschnitt 2.1.3). Die Informationen des Bauleiters reichen jedoch in der Regel nicht aus, um dies aus der Ferne zu bewerten. Durch Vor-Ort-Begehungen bzw. informelle Gespräche mit Werkern lässt sich diese Lücke schließen und zudem auch die aktuelle und geplante Aktivität im Bauraum feststellen. Dieses Vorgehen birgt jedoch zum einen das Risiko, nicht alle aktuell durchgeführten und geplanten Arbeiten zu erfassen und so Ressourcenkonflikte mit anderen Arbeitsprozessen auszulösen, und ist zum anderen mit einem erheblichen Aufwand verbunden (vgl. Abschnitt 4.2.3). Weiter hängt die Qualität der Entscheidungsfindung des Bauleiters wesentlich von der Aktualität der oben genannten Informationen ab.

Lösen lässt sich das Problem, indem Arbeitspakete nicht in Gänze (auf Baugruppenebene) betrachtet, sondern (ggfs. automatisiert) bis zur untersten Ebene (Bauteilebene) aufgegliedert werden. Dazu sind Fortschritte auf möglichst niedriger Ebene (im besten Fall bauteilweise) und in möglichst kurzen Zeitabständen zurückzumelden. Mithilfe des Informationsmodells (Abschnitt 5.3.1) und der Methoden zur Verortung von Inhalten (Abschnitt 5.2.2) lassen sich der geometrische Wirkungsbereich eines geplanten Montageauftrags und der Fortschritt eines bereits gestarteten Montageauftrags anschaulich visualisieren (vgl. Abschnitt 5.2.3). Die Darstellung auf einem 2D-Plan bietet eine gute Gesamtübersicht. Die Nutzung digitaler Assistenzsysteme (vgl. Abschnitt 5.3.2) oder die Bestätigung von Arbeitsschritten in einem digitalen Arbeitsplan ermöglichen es, den Baufortschritt mit geringem Aufwand in Echtzeit auf Bauteilebene zu erfassen und zu melden.

Abbildung 58 zeigt die darauf aufbauende technische Umsetzung zur Aufgabenzuordnung. Die Verknüpfung mit den werkerseitigen, mobilen Assistenzsystemen verschafft dem Bauleiter einen umfassenden Überblick über den Baubereich in Echtzeit. Er kann alle für einen konkreten Baubereich eingewählten Benutzer (Werker und andere Bauleiter) sowie den im aktiven Arbeitsplan verschriebenen Arbeitsfortschritt sehen (67% für Monteur 1 bzw. 33% für Monteur 2). Dies verschafft ihm zunächst einen Eindruck über demnächst fertiggestellte Arbeiten sowie freiwerdende Kapazitäten.

Wählt der Bauleiter einen Montageauftrag aus dem raumbezogenen Bestand aus, zeigt der 2D-Plan die verortete Darstellung des Auftrags auf Grundlage der im Arbeitsplan verknüpften Bauteile bzw. deren geometrischer Positionen (blau hinterlegte Fläche in Abbildung 58). Ergänzend werden offene Störungsmeldungen sowie die bereits als fertig (grüne Flächen) bzw. noch offen (rote Flächen) zurückgemeldeten Bauteile und Baugruppen des vorangehenden Arbeitspakets dargestellt. Zusätzlich werden die im Baubereich befindlichen Aktivitäten (gelbe Flächen für aktuelle und orangene Flächen für geplante Aktivitäten) anderer, sich in der Bearbeitung befindlicher Arbeitspakete visualisiert.

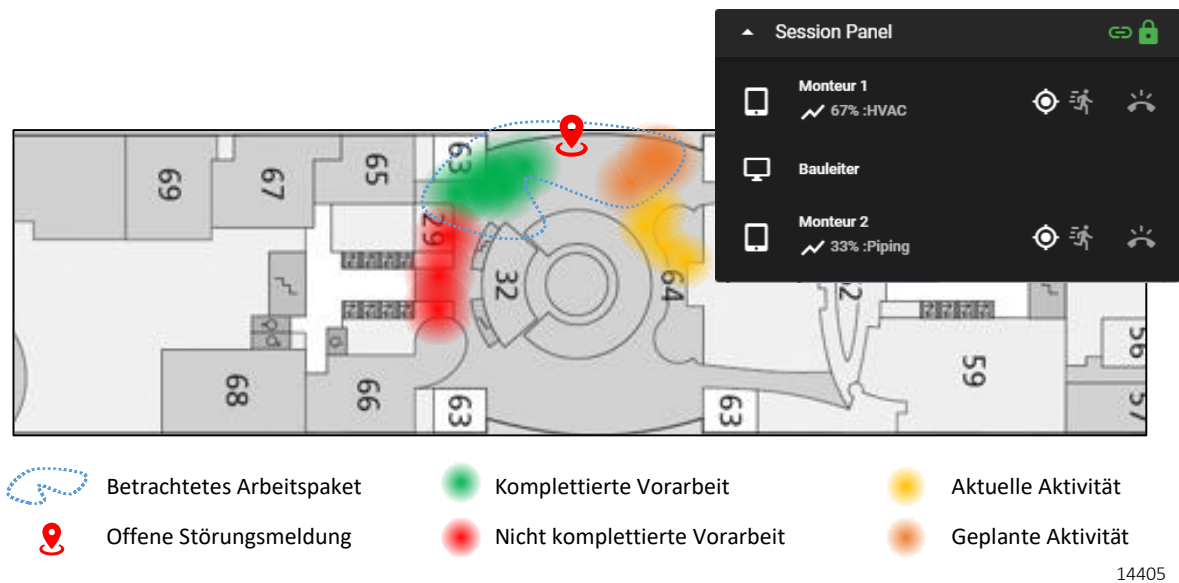


Abbildung 58: Informationsgrundlage zur Arbeitspaketsteuerung

Hat der Bauleiter ein geeignetes Arbeitspaket ausgewählt, kann er es einem konkreten Werker zuweisen. Dieser erhält unmittelbar eine Benachrichtigung und kann die Arbeit ohne Unterbrechung fortsetzen.

Der Bauleiter erhält so eine umfangreiche Informationsgrundlage zur Entscheidungsfindung. Es ist leicht vorstellbar, auf Grundlage der übermittelten Informationen einen Vorschlag für die Aufgabenzuordnung abzuleiten oder diese ganz zu automatisieren. In der Praxis sind die vorliegenden Informationen jedoch im Einzelfall zu priorisieren, so dass es nicht trivial ist, allgemeingültige Regeln zu bilden.

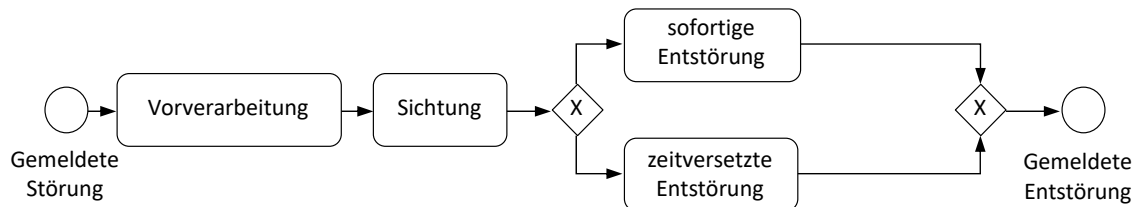
Trotz gezielter Informationsbereitstellung sowie der in diesem Abschnitt vorgestellten Methodik zur Aufgabenzuordnung kann es während der Durchführung zu operativen Störungen (z. B. durch Konstruktionsunklarheiten, Fehlbestände oder Beschädigungen an Bauteilen) kommen. Es stellt sich daher die Frage, wie vom Werker übermittelte Störungen zentral weiterverarbeitet und so ihren Weg zum Entscheidungsträger finden bzw. wie eine möglichst kurzfristige Lösungsfindung bewirkt werden kann.

### 5.5.3 Entstörungsprozess

Mit dem Werkerassistenzsystem können Werker mit wenig Aufwand Störungen melden (Abschnitt 5.4.3). Abbildung 59 zeigt den allgemeinen Ablauf der anschließenden Störungsbearbeitung durch einen Bauleiter. Gemeldete Störungen werden zunächst gefiltert und priorisiert, wobei dieser Prozessschritt in der Praxis aufgrund der unzulänglichen Informationen häufig entfällt und die Störung unmittelbar weiterbearbeitet wird. Die Sichtung der Störung bezeichnet die inhaltliche Erfassung des gemeldeten Problems. Unzulängliche Informationen sorgen dafür, dass dieser Prozessschritt derzeit in der Regel im Zuge einer Vor-Ort-Begehung erfolgt.

Grundsätzlich kann zwischen einer Entstörung vor Ort oder aus der Ferne sowie zwischen einer sofortigen und einer zeitversetzten Entstörung unterschieden werden (vgl. Abbildung 59). In der Praxis

konnte eine klare Tendenz zur sofortigen Entstörung vor Ort erkannt werden (vgl. Abbildung 27). Die Folgen sind eine schlechte Erreichbarkeit der Bauleiter sowie Lauf- und Wartezeiten für Werker und Bauleiter. Die Entscheidung für den einen oder den anderen Pfad hängt maßgeblich von der Qualität und dem Umfang der übermittelten Informationen ab.



14406

Abbildung 59: Prozessschritte zur Lösung von Störungen

Durch das aufwandsarme, aber dennoch informationsreiche Melden von Störungen und ergänzender Fotos ist davon auszugehen, dass mehr Störungen aus der Ferne behoben werden können. Grundsätzlich bestehen aber weiterhin Störungen, die eine so umfangreiche Beschreibung erfordern würden, dass eine Vor-Ort-Begehung die wirtschaftlich bessere Alternative darstellt.

Die zu entwickelnden Werkzeuge lassen sich in Anlehnung an Abbildung 59 in vier Kategorien gliedern:

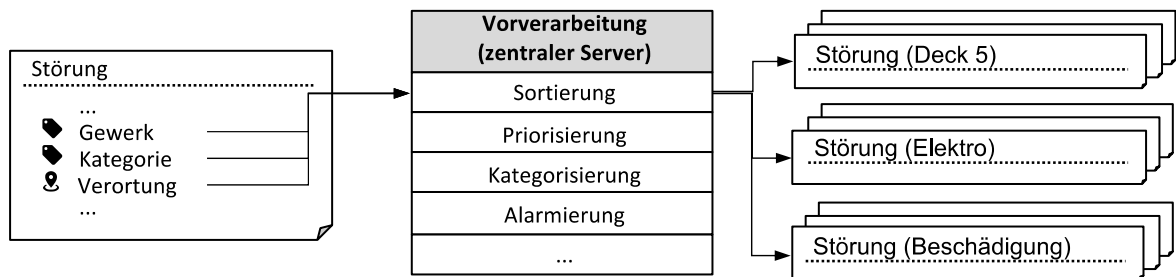
1. Werkzeuge zur Vorverarbeitung
2. Werkzeuge zur Sichtung
3. Werkzeuge zur sofortigen Entstörung
4. Werkzeuge zur zeitversetzten Entstörung

Sämtliche Werkzeuge zur sofortigen oder zeitversetzten Entstörung zielen darauf ab, eine Entstörung aus der Ferne zu unterstützen, da dies klare wirtschaftliche Vorteile mit sich bringt. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die vorgestellten Werkzeuge auch bei einer Entstörung vor Ort mindestens ebenso hilfreich sind.

#### 5.5.4 Vorverarbeitung

Meldet ein Werker eine Störung, überträgt sie das Werker-Assistenzsystem zunächst an einen zentralen Server. Je nach Komplexität des Baubereichs und der Anzahl von Prozessbeteiligten reicht es ggfs. aus, die Störungen zu sammeln und die weitere Priorisierung den Entscheidungsträgern selbst zu überlassen. Bei großen Baubereichen mit vielen beteiligten Gewerken und Bauleitern sowie weiterer Interessensgemeinschaften (Projektleiter, Produktionssteuerer, etc.) ist es jedoch sinnvoll, die Störungsmeldungen automatisch vorzusortieren. Trifft eine Störungsmeldung am zentralen Server ein, durchläuft sie eine mehrstufige Vorverarbeitung (vgl. Abbildung 60): Auf Grundlage der im Störungsmodell verankerten Informationen wird die Störung so beispielsweise gemäß ihrer Verortung, der Kategorie oder einer Gewerkzuordnung sortiert. Mit Hilfe individuell konfigurierbarer Kriterien kann sie dann einem oder mehreren Adressaten zugeordnet werden. Im nächsten Schritt erfolgt wiederum auf Grundlage individuell konfigurierter Parameter eine Priorisierung sowie Kategorisierung. Die Kategorisierung unterteilt die Störungsmeldungen in aktiv zu bearbeitende oder passiv zu verfolgende Störungen.

Über die Filterung von Meldungen nach Örtlichkeiten ist es möglich, sich über eine Vielzahl von Störungen zu informieren, ohne dass hierzu das meldende Gewerk oder gar der konkrete Autor bekannt sein müssen. Die Verfolgung von Störungen im eigenen Baubereich ist wichtig für den eigenen Arbeitsprozess, auch wenn andere Entscheidungsträger die Störungsmeldung inhaltlich bearbeiten. Zuletzt ermöglicht es die zentrale Verarbeitung von Störungsmeldungen eine Alarmierung (z. B. via E-Mail oder Messenger) für einzelne Entscheidungsträger auf Grundlage konfigurierbarer Kriterien einzurichten.



14407

Abbildung 60: Verarbeitung eintreffender Störungen

Nachdem die Störungsmeldungen auf dem Server sortiert, priorisiert und kategorisiert und ggf. Alarme ausgelöst wurden, können die Entscheidungsträger mit der Sichtung der ihnen zugeordneten Störungen beginnen.

### 5.5.5 Sichtung

Das Ziel dieser Prozessphase ist es, dem Entscheider (dem Bauleiter) in möglichst kurzer Zeit einen umfangreichen Eindruck über eine Störung und ihren Kontext zu vermitteln und so eine fundierte Priorisierung der Störung zu ermöglichen. Konkret muss eine erste Übersicht die zentrale Frage „**Was** ist **wo** passiert?“ beantworten. Im Idealfall kann dann anschließend sofort und aus der Ferne eine Entstörung erwirkt werden. Durch die Verortung von Störungen lässt sich die Frage, wo etwas passiert ist, leicht beantworten. Wiederum bietet sich aufgrund der besseren Übersichtlichkeit die Darstellung auf einem 2D-Plan an. Abbildung 61 zeigt die technische Realisierung der Störungsübersicht. Neben dem interaktiven 2D-Plan werden die zugeordneten Störungen in einer Liste dargestellt. Die Liste kann nach verschiedenen Kriterien sortiert oder auch gruppiert werden und verfügt über eine globale Suchfunktion. Wählt der Bauleiter einzelne Störungen mittels Kontrollkästchen aus, reagiert der 2D-Plan entsprechend und stellt ebenfalls nur ausgewählte Störungen dar. Ergänzend erhält der Bauleiter einen Überblick, wie viele der vorliegenden Störungen noch offen sind (Fortschrittsbalken oben).

Die ausführlichen Informationen über eine Störung sind in eine separate Ansicht ausgelagert. Abbildung 62 zeigt die technische Umsetzung dieser Detailansicht. Neben den bereits genannten Informationen bietet die Ansicht die Möglichkeit, die Störungsmeldung zu verändern bzw. zu ergänzen. Der Bauleiter erhält neben den textuellen, beschreibenden Informationen eine Galerieansicht verknüpfter Fotos. Aufgrund der entwickelten, kontextsensitiven Fotodokumentation besteht darüber hinaus die Möglichkeit, weitere, in der unmittelbaren Umgebung verfügbare Fotos einzublenden, selbst wenn diese nicht aktiv mit der Störung verknüpft wurden. Durch die umfangreiche (und somit

auch über die Störungsmeldung hinausgehende) Informationsgrundlage erhält der Bauleiter einen detaillierten Einblick in den Kontext der Störung. Somit stellt die Detailansicht den Einstiegspunkt für die Entstörung dar.

The screenshot displays a software interface for managing incident reports. At the top, it shows 'Störungsmeldungen [3]' and a progress indicator '34% (1/2)'. Below this is a floor plan with rooms numbered 8 through 20. A red location pin is placed in room 15. Below the floor plan are buttons for 'Layout', 'NEUE MELDUNG', and 'DOWNLOAD'. A search bar contains the text 'Suche'. Below the search bar is a table with the following data:

<input type="checkbox"/>	ID	Priorität	Kategorie	Bauteilreferenz	erzeugt am	fällig am	verbleibende Tage	Autor	Fotos	Status
<input type="checkbox"/>	1	low	Beschädigung	Pipe_1	17.6.2022, 22:12:06	21.6.2022, 00:00:00	3	randy		✓
<input type="checkbox"/>	2	medium	Beschädigung	Pipe_4	17.6.2022, 22:13:17	21.6.2022, 00:00:00	3	randy	1	✗
<input type="checkbox"/>	3	medium	Beschädigung	Pipe_4	17.6.2022, 22:13:28	21.6.2022, 00:00:00	3	randy		✗

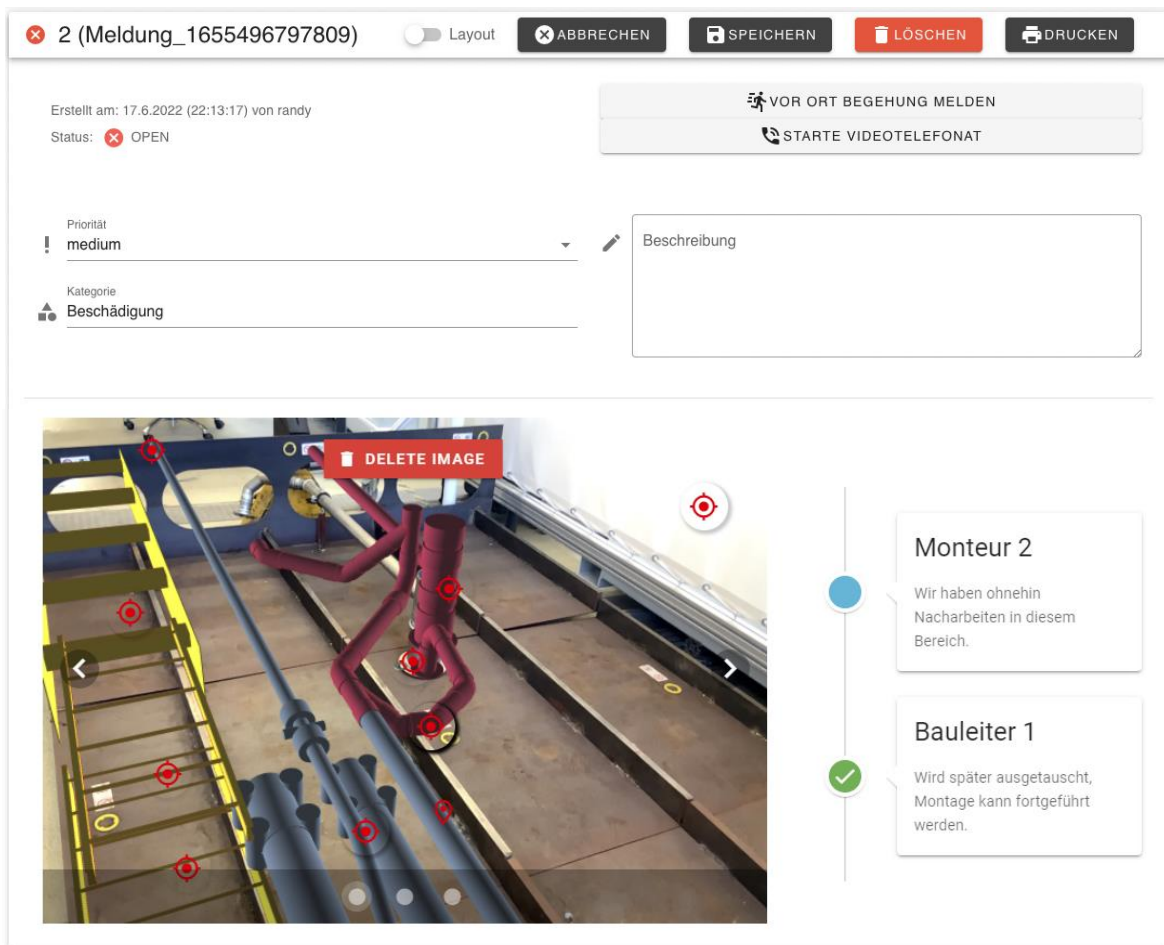
14408

Abbildung 61: Übersicht zugeordneter Störungsmeldungen

### 5.5.6 Zeitversetzte Entstörung

Bei einer zeitversetzten Entstörung sind weder der Werker noch der Bauleiter auf die unmittelbare Verfügbarkeit des Gegenübers angewiesen. Störungsmeldung, Störungsbearbeitung und Lösung sowie die Lösungsanalyse und -umsetzung werden zeitlich unabhängig voneinander durchgeführt und können so zu geeigneten Zeitpunkten, z. B. erst nach Abschluss einer anderen Tätigkeit, durchgeführt werden.

Möglicher Nachteil der zeitversetzten Entstörung ist eine längere Entstörzeit. Viele Störungen erfordern jedoch keine unmittelbare Lösung und Entstörzeiten von einigen Stunden wären für den Prozess nicht hinderlich. Ziel ist es dennoch, auch zeitversetzte Entstörungen möglichst schnell durchführen zu können. Hierzu ist es erforderlich, den Bauleiter auf neue Störungen hinzuweisen und ihm eine Möglichkeit zu geben, die Lösung in direktem Bezug zur Störung zu dokumentieren, an den Werker weiterzuleiten und diesen auf den neuen Lösungsvorschlag hinzuweisen. Die Störungsvorverarbeitung (Abschnitt 5.5.4) ermöglicht eine Alarmierung des Bauleiters. Der Bauleiter kann dann seinen Lösungsvorschlag als Kommentar in der Störungsmeldung dokumentieren (vgl. Abbildung 62 rechts unten). Durch die geteilte Datenbasis wird der Lösungsvorschlag zeitnah (im Idealfall sofort) mit den dezentralen Assistenzsystemen der Werker synchronisiert.



14409

Abbildung 62: Detailansicht einer Störungsmeldung

Das Assistenzsystem weist den Werker auf die aktualisierte Störungsmeldung hin. Der Werker hat anschließend die Möglichkeit, mittels eines Kommentars auf den Lösungsvorschlag zu reagieren oder diesen als Lösung zu akzeptieren. Die Störung wird anschließend geschlossen.

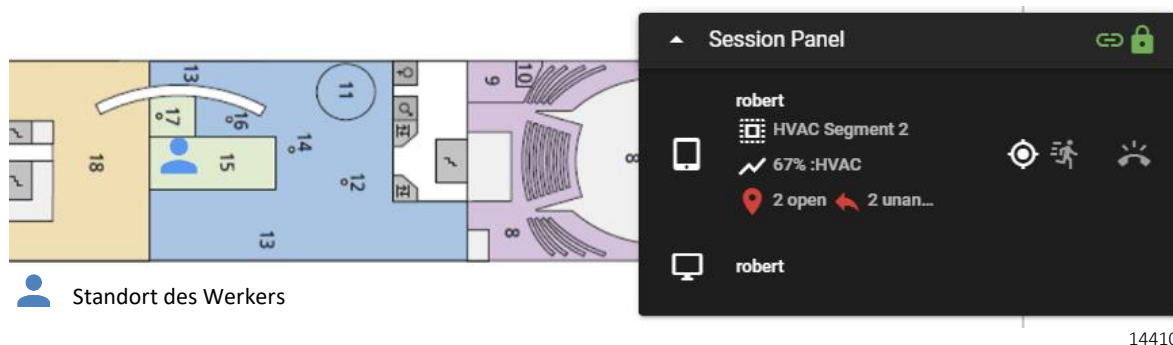
Bei konstruktionsbedingten Störungen sind häufig Ingenieure oder technische Produktdesigner zu Rate zu ziehen, bei Störungen im Materialfluss Materialdisponenten. In all diesen Fällen ist es erforderlich, die Bearbeitung von Störungsmeldungen an Dritte zu delegieren. Dazu können im Demonstrator Direktlinks zu den Störungsmeldungen versendet werden. Die kontaktierten Personen können die Störung mithilfe des Links öffnen, Lösungen erarbeiten und dokumentieren und anschließend die Meldung aktualisieren.

Reicht die Informationsgrundlage des Bauleiters (oder beteiligter Dritter) nicht aus, um eine Entscheidung aus der Ferne zu erwirken, besteht entweder die Möglichkeit, sich zu gegebener Zeit (zeitversetzte Entstörung) selbst ein Bild der Lage vor Ort zu machen und anschließend auf die Störung mittels Kommentar zu reagieren, oder auch den Werker direkt zu kontaktieren und so eine Entstörung in Echtzeit zu initiieren.

### 5.5.7 Entstörung in Echtzeit

Entschließt sich der Bauleiter nach Sichtung der Störungsmeldung für eine Entstörung in Echtzeit,

entsteht Bedarf für einen direkten Kontakt. Grundsätzlich bestehen zwei mögliche Formen der Kollaboration in Echtzeit (vgl. Abbildung 27): Eine Entstörung vor Ort oder aus der Ferne. Im ersten Fall können Warte- und Suchzeiten entstehen. Die Entstörung aus der Ferne, etwa per Telefonat, birgt dagegen das Risiko einer unzureichenden oder missverständlichen Informationsübermittlung. Um beide Wege der Entstörung zu unterstützen, wurden die digitalen Assistenzsysteme für Werker und Bauleiter um zwei Werkzeuge erweitert: Werker können ihren Standort im Bauraum teilen. Dies ermöglicht es dem Bauleiter, im Falle einer Vor-Ort-Begehung schnell den richtigen Ort zu finden. Des Weiteren hat der Bauleiter die Möglichkeit eine Vor-Ort-Begehung anzukündigen (vgl. Schaltfläche in Abbildung 62 rechts oben), sodass sich der Werker im Idealfall nicht vom Einsatzort entfernt. Abbildung 63 zeigt die technische Umsetzung der Übersicht über akute Störungsfälle für den Bauleiter. Auch der Standort des Werkers wird neben den Störungsmeldungen auf dem 2D-Plan verzeichnet. Die Positionsinformation entstammt dabei dem Trackingsystem des AR-fähigen Assistenzsystems (vgl. Standort des Werkers in Abbildung 36). Der Bauleiter kann erkennen, welcher Werker Störungsmeldungen übermittelt hat und ob diese noch unbeantwortet sind. Er kann daher Vor-Ort-Begehungen so planen, dass er mehrere Störungen zugleich bearbeiten kann. Das System kann dadurch sowohl die Laufwege der Bauleiter als auch die Wartezeiten der Werker verringern. Meldet der Bauleiter den betroffenen Workern eine Vor-Ort-Begehung, erhalten diese unmittelbar eine Meldung auf ihr Assistenzsystem.



14410

Abbildung 63: Übersicht akuter Störungsfälle, Grundriss nach [AIDA22]

Ist aus Sicht des Bauleiters kein Vor-Ort-Termin notwendig, kann er eine entfernte Live-Sitzung mit dem Werker initiieren. Der Werker kann die Sitzungsanfrage annehmen und den Bildschirm des Assistenzsystems freigeben sowie das aktuell ausgewählte Bauteil übermitteln.

Eine Sprachübertragung ermöglicht es dem Bauleiter und dem Werker, die konkrete Störung zu erörtern und eine geeignete Lösung zu finden. Diese Funktion wurde im Rahmen der Demonstratorentwicklung nicht umgesetzt und bei der Evaluation durch eine parallele Telefonverbindung ersetzt.

## 5.6 Aufbau und Integration des Gesamtsystems

Das entwickelte mobile Assistenzsystem für Werker ermöglicht es, Störungen im Produktionsprozess aufwandsarm und mit einem hohen Informationsgehalt zu dokumentieren. Die Störungsmeldungen werden an einen zentralen Server übertragen, dort verarbeitet und regelbasiert geeigneten Adressaten (Bauleitern und anderen Entscheidungsträgern bzw. Interessengruppen) zugewiesen. Das Assistenzsystem für Bauleiter stellt die Störungsmeldungen übersichtlich zusammen und unterstützt

die Bauleiter in der Lösungsfindung und -dokumentation. Im Idealfall genügt ein kurzer textueller Hinweis, der automatisiert an die Assistenzsysteme der Werker übermittelt wird und dort zur Lösung beiträgt. Genügt dies nicht, können Bauleiter Live-Sitzungen einberufen und den entfernten Werker mithilfe eines geteilten Bildschirms anleiten bzw. das Problem und mögliche Lösungen kollaborativ diskutieren. Ist ein Vor-Ort-Besuch notwendig, können Bauleiter diese zentral anmelden. Ein übersichtlicher 2D-Plan stellt sowohl die verorteten Störungsmeldungen als auch die Standorte der Werker dar. Dies hilft dabei, Vor-Ort-Besuche sinnvoll zu planen und so Lauf- und Wartezeiten einzusparen.

Aufgrund des komplexen Aufbaus der Assistenzsysteme, des Servers und der notwendigen Schnittstellen zu Drittsystemen ist die Integration der Teillösungen in die Prozesse der Unikatproduktion eine Herausforderung. Sie ist auch eine Voraussetzung dafür, die Lösungen kurzfristig in der Industrie anwenden und langfristig wirtschaftlich betreiben zu können. Im Folgenden wird daher aufgezeigt, wie die Lösungsbestandteile zu einem Gesamtsystem zusammengefasst (Abschnitt 5.6.1) und an bestehende Systeme in der Unternehmens-IT angebunden werden können (Abschnitt 5.6.2). Da insbesondere die drahtlose Bereitstellung großer Datenmengen in Produktionsumgebungen ein Problem darstellt, geht Abschnitt 5.6.3 detailliert auf diese Herausforderung ein und zeigt entsprechende Lösungswege auf. Zuletzt wird die Möglichkeit einer Teilintegration aufgezeigt (Abschnitt 5.6.4).

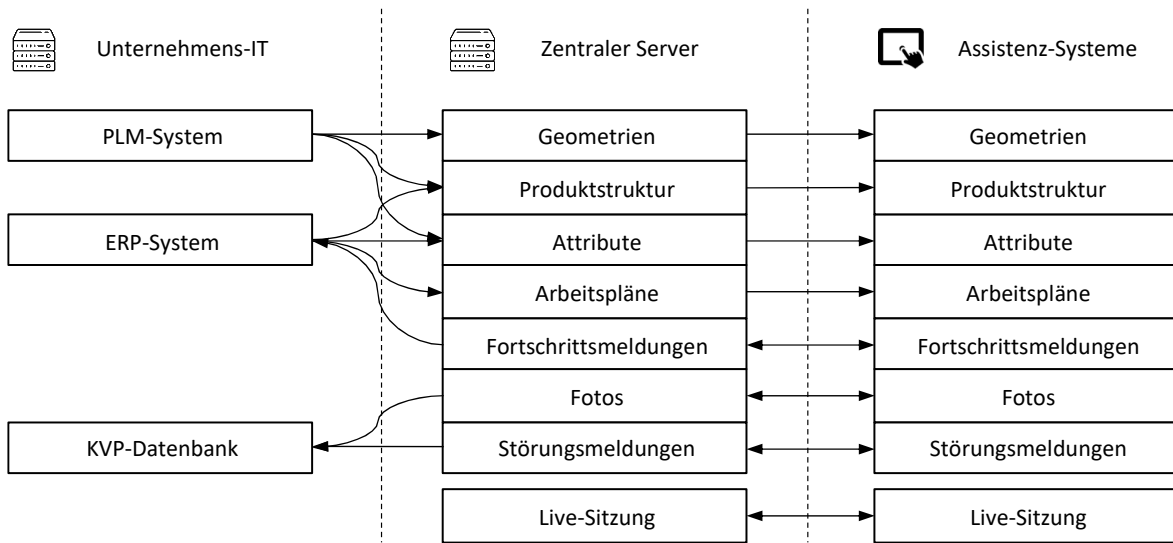
### 5.6.1 Aufbau des Gesamtsystems

Die wesentlichen technischen Artefakte als Teillösungen dieser Arbeit sind

- ein mobiles Assistenzsystem für Werker, umgesetzt als Tablet-Anwendung,
- ein hybrides (desktopbasiertes und zugleich mobilfähiges) Assistenzsystem für Bauleiter, umgesetzt als Web-Anwendung und
- ein zentraler Server zur Datenbereitstellung und -verarbeitung, umgesetzt als containerisierte Serveranwendung.

Technisch unterscheiden sich die Assistenzsysteme für Bauleiter und Werker nicht voneinander, da sie dieselben Schnittstellen zum zentralen Server nutzen. Eine direkte Anbindung der Assistenzsysteme an entsprechende Quellsysteme (PLM, PDM, ERP) einzurichten, gestaltet sich in der Praxis schwierig: Die Systeme verfügen in der Regel nicht über die notwendigen Schnittstellen, um die spezifischen Datenbedarfe der Assistenzsysteme zu decken. Es bedarf daher eines zentralen Servers als Bindeglied zwischen Quellsystem und Assistenzsystem. Der zentrale Server bindet die Quellsysteme an, verarbeitet die Daten und stellt sie den Assistenzsystemen zur Verfügung (vgl. Abbildung 64). Darüber hinaus stellt er weitere, für den Betrieb der Assistenzsysteme notwendige Funktionen bereit, die z. B. die Datenströme der Echtzeit-Sitzungen zentral steuern. Die Separation von IT-Aufgaben in einzelne, autark entwickelte, betriebene und gewartete Bausteine ist insbesondere in großen Unternehmen ein wichtiges Werkzeug, um komplexe monolithische Systeme zu vermeiden. Beispielsweise benötigen unterschiedliche unternehmensinterne Applikationen eine Authentifizierungsroutine, die Anwender mit entsprechenden Berechtigungen ausstattet oder ihnen den Zugang verwehrt. Andere Anwendungen erfordern Zugriffe auf Dateisysteme oder Unternehmensressourcen wie Mitarbeiterdaten oder Daten aus Warenwirtschaftssystemen. Durch die Kapselung der Funktionen und die geteilte Nutzung der Ressourcen entstehen Synergien und neue Anwendungen lassen sich leicht in die bestehende Struktur integrieren. Beim Entwurf einer neuen Anwendung sind die

Grenzen einzelner Funktionen sinnvoll festzulegen. Hierzu ist zu beantworten, ob eine einzelne Funktion bereits existiert und genutzt werden kann und ob eine neue Funktion zukünftig auch für andere Anwendungen nutzbar sein könnte.

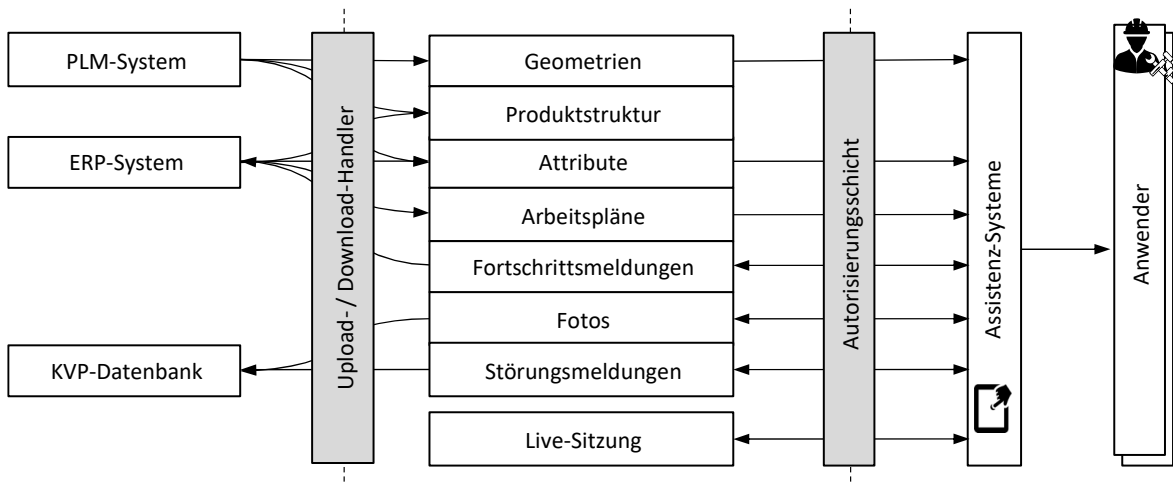


PLM: Product Lifecycle Management | ERP: Enterprise Resource Planning | KVP: Kontinuierlicher-Verbesserungs-Prozess

14411

Abbildung 64: Systemübersicht

Ein gutes Beispiel für eine in der Regel verfügbare Funktionalität ist ein Authentifizierungs- und Autorisierungssystem. Dieses sorgt dafür, dass Anwender eindeutig über ihre Benutzerkennung identifiziert und im Sinne eines Rollen- / Rechtesystems Zugriff auf individuelle Systeme erhalten. Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Gesamtsystem, bestehend aus den oben genannten Artefakten, wurde für den testweisen Praxiseinsatz um zwei Komponenten ergänzt (vgl. Abbildung 65): Eine austauschbare Autorisierungsschicht sorgt dafür, die Kommunikation mit dezentralen Assistenzsystemen abzusichern und den Anwendern die Nutzung der im betrieblichen Alltag verwendeten Benutzerkennungen zu ermöglichen.



PLM: Product Lifecycle Management | ERP: Enterprise Resource Planning | KVP: Kontinuierlicher-Verbesserungs-Prozess

14412

Abbildung 65: Erweiterte Systemübersicht

Um zugleich funktionale Redundanzen zu bestehenden Systemen zu vermeiden und die Komplexität einer vollständigen bidirektionalen Anbindung der bestehenden (Quell-)Systeme zu umgehen, wurde das System zudem um Maschine-zu-Maschine-Schnittstellen erweitert. Spezifische Handler überwachen den Datenverkehr und verarbeiten bzw. transformieren eintreffende oder abgerufene Daten. Ziel ist es, die bestehenden Export-Funktionalitäten von PLM- und ERP-Systemen zu nutzen und die dort abgerufenen Daten automatisiert oder auch manuell an die entsprechende Schnittstelle des zentralen Servers zu übertragen. Die Handler verarbeiten die eintreffenden, meist proprietär strukturierten Daten und speichern sie in den speziell für die Übertragung an die Assistenzsysteme konzipierten Datenstrukturen. Werden von den Assistenzsystemen exklusiv im zentralen Server vorhandene Daten in anderen Systemen benötigt, sorgen wiederum entsprechende Handler dafür, die Datenstruktur in einfach weiterzuverarbeitende, teils sehr spezifische Strukturen zu wandeln und entsprechend für den manuellen bzw. automatischen Abruf bereitzustellen.

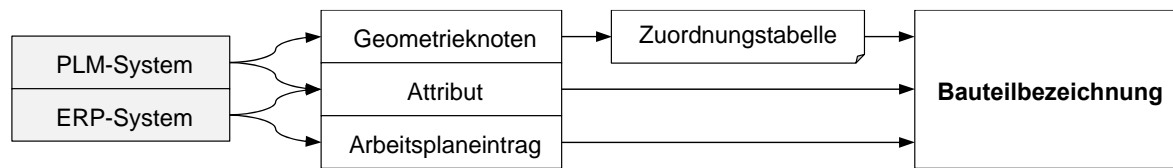
Im folgenden Abschnitt wird vor diesem Hintergrund insbesondere auf die Verarbeitung von Stücklisten und Geometriedaten eingegangen.

### 5.6.2 Datenübernahme aus bestehenden IT-Systemen

Wie aus der Systemübersicht (vgl. Abbildung 64 und Abbildung 65) hervorgeht, stellen unternehmensinterne IT-Systeme im Wesentlichen die Geometrien, die Produktstruktur, Attribute sowie Arbeitspläne für die Assistenzsysteme bereit. Zentrales Ordnungselement für die Konsolidierung unterschiedlicher Informationen ist das Bauteil (vgl. Abschnitt 5.3.1). Die Konsolidierung ist Grundlage für eine einfache Realisierung komplexer Querverweise. Diese kann jedoch nur dann umgesetzt werden, wenn sämtliche Informationen bzw. die darunterliegenden Daten in Bezug zu einem einheitlichen Bauteilbezeichner (Sachnummer) gesetzt werden können. In der industriellen Praxis gestaltet sich dies aufgrund gewachsener Strukturen und einer Vielzahl beteiligter Abteilungen als schwierig: Zentrale Prozesse der Warenwirtschaft orientieren sich zumeist an einer klassischerweise im ERP-System verankerten Produktstruktur mit spezifischen Artikelbezeichnern für Baugruppen und Bauteile. Die Konstruktion als Entstehungsort der Geometrien verwendet in der Praxis jedoch häufig abweichende, meist sprechende Benennungen von Baugruppen und Bauteilen. Nur im Idealfall liegt daher durch den Einsatz entsprechender PLM-Systeme oder strikter Vorgaben in der Bauteilbenennung und -strukturierung von vornherein eine einheitliche Systematik für die Bezeichnung von Bauteilen, Baugruppen und zugehörigen Geometrien vor. Insbesondere in kleinen und mittelständischen Unternehmen ist aufgrund heterogen entstandener IT-Systeme häufig keine einheitliche Zuordnungsmetrik vorhanden. Eine Zuordnung von Bauteilbezeichnern in einer Stückliste (aus dem ERP-System) und dem zugehörigen Geometriemodell (aus dem CAD-System) ist also nicht immer trivial.

#### Verknüpfung von Geometrie- und Metadaten

Um dennoch den Einsatz der Assistenzsysteme (insbesondere auch zu Testzwecken im Rahmen der Evaluation) zu ermöglichen, werden Geometriedaten im Assistenzsystem über eine Zuordnungstabelle mit den Bauteilbezeichnungen in Verbindung gebracht (vgl. Abbildung 66).



14413

Abbildung 66: Datenübernahme aus bestehenden IT-Systemen

Diese Zuordnungstabelle lässt sich im besten Fall mit sinnvollen Regeln automatisch erstellen (z. B. wird in ERP-Systemen häufig auf Leerzeichen verzichtet und stattdessen ein Unterstrich verwendet, dies lässt sich mit einfachen Textoperationen in der Zuordnungstabelle festhalten). Häufig werden die Bezeichner im ERP-System als Attribut eines Geometrieknotens gepflegt, sodass sich auch in diesem Fall einfach eine Zuordnungstabelle ableiten ließe. Im schlechtesten Fall muss die Zuordnungstabelle händisch erzeugt werden.

Wie bereits erläutert, ist die Leistungsfähigkeit der Endgeräte bzw. die Rendering-Qualität der Assistenzsysteme ein wichtiger Stellhebel, um die Nutzerzufriedenheit zu steigern (vgl. Abschnitt 5.3.4): Für eine uneingeschränkte Akzeptanz muss das Assistenzsystem eine hohe Reaktionsgeschwindigkeit sowie eine flüssige Darstellung bereitstellen. Dies ist für die komplexen Produkte der Unikatproduktion besonders schwierig, gelingt jedoch mit der Vorverarbeitung und Vereinfachung von Geometrien (vgl. Abschnitt 5.3.4).

### Angepasste Geometrievorverarbeitung

Das entwickelte Vorgehen zur Vorverarbeitung komplexer Geometrien reduziert die Anzahl der Dreiecke auf etwa die Hälfte. Die verfügbaren Algorithmen führen jedoch je nach Ausgangsdatensatz zu unterschiedlich guten Ergebnissen. Ein wesentliches Problem in der industriellen Praxis ist, dass häufig Konstruktionsdienstleistungen eingekauft werden, um Spezial- oder Standardbauteile auszuarbeiten. Das 3D-Modell des Produkts entstammt daher häufig nicht einem einzigen Konstruktionsprogramm, sondern ist vielmehr eine Zusammensetzung vieler unterschiedlicher Datensätze aus unterschiedlichen Quellsystemen. Ein Teil der Bauteile hat daher bereits unterschiedliche Vorverarbeitungsschritte durchlaufen (z. B. beim Export aus dem Quellsystem). Erste Versuche haben schnell gezeigt, dass der Einsatz eines einzigen Verfahrens zur Geometriereduzierung zu keinem zufriedenstellenden Ergebnis führt. Vielmehr hat es sich als zielführend erwiesen, eine Baugruppe automatisiert in ihre Einzelteile zu zerlegen und die Geometrie jedes Teils auf bestimmte Merkmale zu untersuchen und abhängig davon eine individuelle Vorverarbeitung zu konfigurieren. Als ein zentrales Merkmal kann die Repräsentationsform des Bauteiles dienen: Liegt das Teil als parametrisiertes Modell vor, können effizientere Algorithmen zur Tessellierung (Zerlegung in diskrete Dreiecke) verwendet werden als zur Vereinfachung bereits tessellierter Geometrien. Da beide Repräsentationsformen in modernen 3D-Formaten koexistieren können, ist das Merkmal auf Einzelteilebene zu prüfen. Ein weiteres Kriterium ist die Netzdichte tessellierter Bauteile: Häufig sind Exportvorgänge so konfiguriert, dass selbst kleinste Bauteile in eine Vielzahl von Dreiecken zerlegt werden und so beispielsweise Kühlkörper auf Platinen aufgrund ihrer Lamellenstruktur trotz ihrer geringen Größe einen sehr hohen Anteil an der Dreiecksanzahl einer Baugruppe haben. Für die Montage ist dieser Detailgrad jedoch nur selten erforderlich, so dass die Leistungsreserven der Endgeräte unnötigerweise durch diese Kleinteile ausgelastet werden. Als Lösung ist der vollständige Austausch der Bauteilgeometrie durch primitive Körper (Quader, Kugel, Kapsel, etc.) zielführend. Praxisversuche im Rahmen dieser

Arbeit zeigten, dass dieser Ansatz die Dreiecksanzahl deutlich reduzieren kann.

Die Zuordnung von Geometrie- und Metadaten ist in vielen Unternehmen problematisch. Dieser Abschnitt hat Wege aufgezeigt, diesem Problem zu begegnen. Während der Systementwicklung und in den Fallbeispielen der Evaluation war der Einsatz derartiger Algorithmen nicht notwendig, da die Daten bereits eine hohe Kohärenz aufwiesen. Die entwickelten Bausteine zur automatisierten Geometrievorverarbeitung wurden hingegen in das Gesamtsystem integriert und haben so die Anbindung bestehender IT-Systeme in den Evaluationsszenarien ermöglicht.

### 5.6.3 Datenübertragung an die Assistenzsysteme

Die dezentralen Assistenzsysteme benötigen im Wesentlichen Geometriedaten, Attributlisten und Arbeitspläne. Die Assistenzsysteme zeigen diese Daten an, ohne sie zu verändern. Sie erfassen durch die entwickelten Funktionalitäten jedoch Fortschrittmeldungen, Fotos und Störungsmeldungen und tauschen sie mit anderen (Assistenz-)Systemen aus. Auch Live-Sitzungen erfordern einen bidirektionalen Datenaustausch zwischen den Assistenzsystemen von Bauleitern und Werkern. Es ergeben sich grundsätzlich zwei Anwendungsfälle:

#### 1. Statische Daten / vereinzelter Austausch großer Datenmengen

Zwar sind Geometrien, Attribute und Arbeitspläne in kurzen Zeitabständen zu synchronisieren bzw. auf notwendige Synchronisationen zu prüfen, jedoch bleiben die Daten in aller Regel über Zeiträume von mehreren Minuten oder gar Stunden unverändert. Kommt es zur Synchronisation, sind jedoch aufwändige Prozesse wie die Verarbeitung neuer Störungsmeldungen oder die Ablage von Fotos im Dateisystem anzustoßen. Wie bereits erwähnt, ist es unumgänglich, die zur Visualisierung notwendigen sowie in den Assistenzsystemen erzeugten Daten über einen längeren Zeitraum lokal auf den Endgeräten vorzuhalten, um eine Offline-Nutzung zu ermöglichen. Der Ansatz führt zu Datenredundanzen zwischen den Einzelsystemen und damit zu einer Situation, in der Daten in verschiedenen Aktualitätsstufen koexistieren, was Probleme in der Datenqualität hervorrufen kann [Domb21, S. 551]. Um dies zu vermeiden, können die Datensätze bei konfliktbehafteten Synchronisationsvorgängen versioniert oder Werkzeuge zum Vereinen redundanter Datensätze eingesetzt werden.

Auf technischer Seite sind sogenannte REST (Representation State Transfer) APIs (Application Programming Interfaces) seit Jahren der Standard bei der Datenkommunikation zwischen verteilten Systemen. Im Rahmen der technischen Umsetzung dieser Arbeit wurde der Austausch (quasi) statischer Daten ebenfalls mithilfe des REST-Ansatzes abgewickelt.

REST-Schnittstellen basieren auf einem klassischen Frage-Antwort-System und ermöglichen somit nur bedingt bidirektionale Verbindungen. Insbesondere wenn schnelle, beidseitige Antwortzeiten gefordert werden, kommt die Technologie schnell an ihre Grenzen. Es bedarf daher eines ergänzenden Ansatzes zum hochfrequenten Austausch dynamischer Daten.

#### 2. Dynamische Daten/ hochfrequenter Austausch kleiner Datenmengen:

Bei einer kollaborativen Live-Sitzung werden geringe Datenmengen in einer hohen Frequenz ausgetauscht. Hierbei sind Übertragungsfehler bei einzelnen Datensätzen häufig vernachlässigbar und

auch ist keine Weiterverarbeitung, sondern lediglich die Weiterleitung bzw. Darstellung der Daten von Interesse.

Die während einer Live-Sitzung auszutauschenden Daten beschränken sich im konkreten Fall einer kollaborativen Sitzung zwischen Werker und Bauleiter auf die folgenden Daten:

- Benutzername
- Bauteilbezeichner
- aktuelle Pose in x-, y-, z-Koordinaten sowie x, y, z, w-Quaternionen
- aktuell dargestellter Frame
- ID des aktuellen Arbeitsplans
- Fortschritt im aktuellen Arbeitsplan
- IDs unbeantworteter Störungsmeldungen

Die Größe eines derartigen Datensatzes beschränkt sich bei deaktivierter Bildschirmübertragung auf wenige Kilobyte. Sogenannte Websockets wurden speziell für den hochfrequenten Austausch von Daten geringer Größe konzipiert [Mozi21]. Sie lassen sich einfach in hybride Webanwendungen integrieren und werden häufig eingesetzt.

### Wege der Datenübertragung

Um statische und dynamische Daten zwischen dem zentralen Server und den dezentralen Clientsystemen auszutauschen, ist eine ausreichend schnelle Netzwerkverbindung erforderlich, in vielen Unternehmen jedoch nicht vorhanden: Die unzureichende Abdeckung weitläufiger Baustellen sowie die Verwendung von Stahlkonstruktionen in raumgebenden Baugruppen (insbesondere im Schiff- sowie Stahlbetonbau) führen zu längeren Zeiträumen, in denen Clientsysteme ohne eine Serververbindung auskommen müssen. Zwar wurden in den vorangegangenen Abschnitten Lösungswege für den Offline-Betrieb aufgezeigt, jedoch stellen diese vornehmlich Kompromisse dar, um die Lauffähigkeit des Gesamtsystems sicherzustellen und sind mit Nachteilen verbunden: Kollaborative Lösungsfindungen in Echtzeit sind nicht möglich und auch das Melden von Störungen erfolgt erst zeitversetzt. Es stellt sich daher die Frage, inwieweit alternative Technologien wie etwa die Bereitstellung von Daten mittels Mobilfunknetz das Problem lösen können.

Derzeit stellt 4G den Standard im Mobilfunkwesen dar, wird jedoch punktuell durch den leistungsfähigeren 5G-Standard ersetzt. Letzterer bietet wesentliche Vorteile in der verfügbaren Download- sowie Uploadgeschwindigkeit und in der Abwicklung einer Vielzahl paralleler Verbindungen je Antenne. 5G bietet darüber hinaus mittels Beamforming-Technologie die Möglichkeit, die Leistung einer Antenne auf explizite Bereiche (etwa einen konkreten Bauraum) zu fokussieren und dort eine deutlich höhere Signalstärke bereitzustellen [Jodl19]. Ferner kann 5G Materialien wie Aluminium oder Faserverbund besser durchdringen und so z. B. auch innerhalb einer metallischen Kabine eine hohe Bandbreite zur Verfügung stellen [Krzo20]. Im Rahmen eines Feldversuchs wurde die verfügbare Downloadgeschwindigkeit beim Herunterladen eines vollständigen Datensatzes (inkl. Geometriedaten) über eine WLAN-, eine 4G- sowie eine Beamforming-5G-Verbindung ermittelt. Die dargestellten Daten wurden erhoben, indem ein von der Dateigröße und -struktur repräsentatives Projekt einmalig vom Server heruntergeladen wurde, wobei sichergestellt wurde, dass im WLAN sowie im 5G Netz-

werk nur ein einziges Gerät eingewählt war. Für das öffentliche 4G-Netzwerk ließ sich diese Randbedingung weder im Testfall noch im Realeinsatz gewährleisten. Abbildung 67 zeigt eine relative Gegenüberstellung der erhobenen Geschwindigkeiten. Die Rohdaten sind in Anhang A dargestellt, unterliegen jedoch der Geheimhaltung. Sie wurden den Mitgliedern des Promotionsausschusses vorgelegt und im Zuge der Veröffentlichung entfernt.

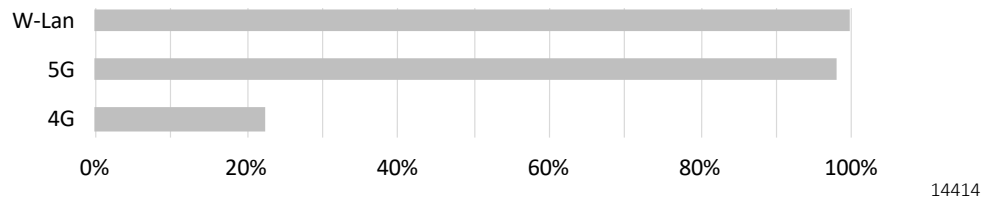


Abbildung 67: Downloadgeschwindigkeit mittels W-Lan, 4G und 5G

Eine WLAN-Verbindung ermöglicht demzufolge die bestmögliche Downloadgeschwindigkeit, wobei eine Verbindung im 5G-Campusnetzwerk eine annähernd gute Leistung erzielt. Der Download des Testdatensatzes mittels 4G-Verbindung weist hingegen eine deutlich reduzierte Geschwindigkeit auf. Weiter hat der Feldversuch gezeigt, dass sich die verfügbare Geschwindigkeit des 4G-Netzwerks erheblich verringert, wenn das Endgerät umschlossen von raumgebenden Bauteilen aus metallischen Werkstoffen ist, die Durchdringung des Beamforming-5G-Netzwerkes davon jedoch weitestgehend unberührt bleibt.

In der Praxis ergeben sich im Wesentlichen zwei Alternativen: Der Ausbau eines flächendeckenden WLAN-Netzwerks oder die Nutzung von (idealerweise Beamforming-fähigen) 5G-Netzwerken. Die Wirtschaftlichkeit der Alternativen lässt sich aufgrund einer hohen Preisdynamik der noch sehr neuen 5G-Technologie zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht bewerten. Grundsätzlich stellt die Installation eines flächendeckenden WLAN-Netzwerks aufgrund der für diesen Anwendungsfall vergleichbaren Leistungsfähigkeit und des verhältnismäßig geringen Anschaffungs- und Installationsaufwands jedoch eine gute Alternative dar.

### 5.6.4 Teilintegration

In den vorangegangenen Abschnitten wurde ein Gesamtsystem beschrieben, das aus den Assistenzsystemen für Werker und Bauleiter sowie einem zentralen Server besteht. Es wurde aufgezeigt, welche Komponenten der Unternehmens-IT einzubinden sind und welche Herausforderungen bei der Integration bestehen. Neben der technischen Integrationsfähigkeit sind auch die Herausforderungen einer Integration in die operativen Prozesse der Produktion nicht zu unterschätzen. Das entwickelte Gesamtsystem kann leicht den Eindruck erwecken, einzig im großflächigen Einsatz positive Effekte auf die Prozesseffizienz bewirken zu können. Dies wäre insbesondere in Prozessen mit vielen unterschiedlichen Akteuren, Gewerkschaften und Unternehmen problematisch, weil aus Sicht des Veränderungsmanagements sehr viel Überzeugungsarbeit zu leisten wäre.

Bereits eine Teilintegration kann jedoch zu merkbaren Prozessverbesserungen führen: Zum einen ist es möglich, Störungen auch unabhängig von einem Arbeitsplan zu melden. So ließen sich Assistenzsysteme etwa für einen gesamten Bereich zentral bereitstellen und im Falle einer Störung zur Dokumentation heranziehen. Weiterhin ist auch eine Nutzung einzig durch Bauleiter denkbar: Diese können eintreffende Störungen (z. B. per Telefon oder E-Mail) selbstständig im System protokollieren,

priorisieren und weiterbearbeiten. Zwar profitiert in diesem Fall nicht unmittelbar der betroffene Arbeiter, jedoch ist zu erwarten, dass das strukturierte Abarbeiten der so dokumentierten Störungen die Erreichbarkeit der Bauleiter und somit auch die Gesamteffizienz steigern können. Ferner ermöglicht die zentrale Verwaltung von Störungen und etwaige Alarmierung von Betroffenen (z. B. beteiligte Gewerke in einem Bauraum) den Einbezug klassischer Smartphones: E-Mail-Benachrichtigungen können an beliebigen Geräten empfangen werden und weisen den Empfänger auf mögliche Behinderungen im Bauraum und etwaige Terminverschiebungen hin.

## 6 Evaluation des Gesamtsystems

In Abschnitt 4.4 wurde anhand von Prozessanalysen eine strukturierte Anforderungsliste für die digitalen Assistenzsysteme erarbeitet. Ziel dieses Kapitels ist es, die Eignung und den Nutzen der entwickelten Lösungen anhand dieser Anforderungen zu validieren bzw. zu evaluieren. Aufgrund der Vielfalt der gestellten Anforderungen geschieht die Evaluation schrittweise, am Beispiel von unterschiedlichen Einsatzfeldern und mit unterschiedlichen Methoden (vgl. Abbildung 68). Es wurden drei Anwendungsbeispiele aus den klassischen Branchen der Unikatproduktion ausgewählt und die entwickelten Lösungen jeweils im Praxiseinsatz erprobt. Die entwickelten (Teil-) Lösungen wurden so in Form von Demonstratoren in der Kabinenausrüstung im Flugzeugbau (Abschnitt 6.1.1), dem Trockenbau im Bauwesen (Abschnitt 6.1.4) sowie der Ausrüstungsmontage im Schiffbau (Abschnitt 6.2.1) eingesetzt.

	Anforderung	Messgröße	Versuch	Methode	Anwendung
<b>Beherrschung von Abhängigkeiten</b>					
A1-1	Schaffen eines einheitlichen Situationsbewusstseins	Nutzen	Praxis	Expertenbefragung	Schiffbau
A1-2	Schaffen eines einheitlichen und intuitiven Kommunikationskontextes	Nutzen	Praxis	Expertenbefragung	Schiffbau
<b>Gezielte Bereitstellung relevanter Informationen</b>					
A2-1	Aufwandsarme Bereitstellung aktueller, aufgabenübergreifender Informationen	Integrationsfähigkeit	Praxis	Testumgebung	Flugzeugbau, Bauwesen
A2-2	Kontextbezogene und intuitive Informationsaufbereitung	Nutzen	Praxis	Expertenbefragung	Schiffbau
A2-3	Nutzung mobiler, einfach zu handhabender und einfach zu erlernender Medien	Zustimmung	Praxis	Expertenbefragung	Schiffbau
<b>Schnelle und gezielte Kommunikation von Störungen</b>					
A3-1	Aufwandsarme Meldung des Baufortschritts	Meldungsaufwand	Praxis, Labor	Expertenbefragung, Laborversuch	Schiffbau
A3-2	Aufwandsarme Meldung von Produktionsstörungen	Meldungsaufwand	Praxis, Labor	Expertenbefragung, Laborversuch	Schiffbau
A3-3	Kontextbezogene Darstellung von Baufortschritt und Störungen	Nutzen	Praxis	Expertenbefragung	Schiffbau
<b>Unterstützung einer kollaborativen Lösungsfindung</b>					
A4-1	Überbrückung von Hierarchieebenen und Unternehmensgrenzen	Nutzen	Praxis	Expertenbefragung	Schiffbau
A4-2	Zeitversetzte Kommunikation	Nutzen	Praxis, Labor	Expertenbefragung, Laborversuch	Schiffbau
A4-3	Kommunikation in Echtzeit	Nutzen	Praxis, Labor	Expertenbefragung, Laborversuch	Schiffbau

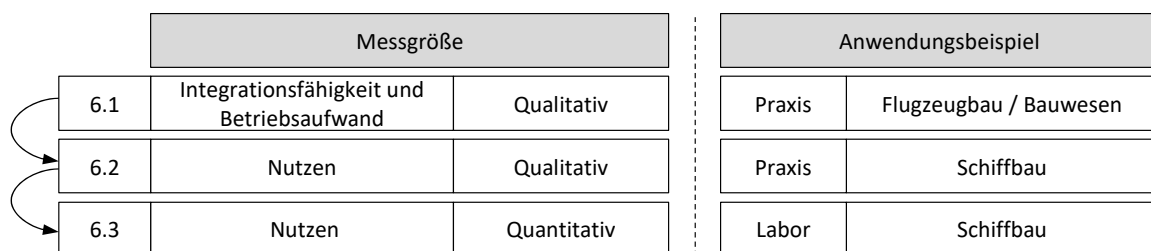
14415

Abbildung 68: Anforderungsliste und Gegenüberstellung von Messgrößen und Methoden

Die Evaluation gliedert sich in drei aufeinander aufbauende Abschnitte (vgl. Abbildung 69): Zunächst erfolgt eine Validierung des Gesamtsystems am Beispiel des Flugzeugbaus (Abschnitt 6.1). Der entwickelte Demonstrator wird hierzu testweise in eine Praxisumgebung implementiert und die entwickelten Datenstrukturen und Schnittstellen echten Anwendungsfällen gegenübergestellt. Die Integrationsfähigkeit ist zum einen eine technische, für den Praxiseinsatz relevante Herausforderung. Zum

anderen ist der effiziente Betrieb des Systems eine wichtige Anforderung, die auch von der technischen Integration abhängt: Gelingt es nicht, die erforderlichen Quellsysteme an das Gesamtsystem anzubinden, würden erhebliche Aufwände in indirekten Bereichen zur manuellen Datenvorbereitung entstehen.

Es wird daher überprüft, ob die in Abschnitt 5.6 vorgestellten Ansätze zur Integration des Systems in die Unternehmens-IT den hohen industriellen Anforderungen des Fallbeispiels gerecht werden und die aufgezeigten, systemischen Schnittstellen in der dargestellten Form nutzbar sind. Ergänzend wird das System mithilfe eines BIM-basierten Datensatzes in einem Fallbeispiel des Bauwesens validiert.



14416

Abbildung 69: Evaluationsstufen

Im zweiten Evaluationsabschnitt erfolgt eine Nutzenbewertung, zunächst qualitativ durch Experten. Hierzu wurden die Assistenzsysteme in einem mehrtägigen Testbetrieb durch Werker und Bauleiter erprobt und anschließend bewertet (Abschnitt 6.2). Ergänzend wurde im dritten Abschnitt ein Laborversuch konzipiert, um den Nutzen des innovierten Prozesses zum Umgang mit Störungen für den Werker quantitativ zu erfassen (Abschnitt 6.3). Die im Labor ermittelten Ergebnisse werden in den Kontext realer Prozesse gesetzt und liefern so einen Transferansatz für weitere Praxisbeispiele.

## 6.1 Bewertung der Integrationsfähigkeit in der Praxis

Das Konzept dieser Ausarbeitung zeichnet sich durch vielfältige Schnittstellen zu Drittsystemen in der IT-Umgebung der Unikatproduzenten aus. Es werden Daten aus PLM-, ERP- und insbesondere CAD-Systemen benötigt. Um das Gesamtsystem sinnvoll in der Praxis einsetzen zu können, ist die Integrierbarkeit in die IT-Systeme der Unternehmen daher ein bedeutender Faktor. Aus diesem Grund wird zuerst die Integrationsfähigkeit in einem realen Praxiszenario bewertet. Gelingt es, das System vollständig an die im Unternehmen verfügbaren Quellsysteme anzuschließen und notwendige Datenkonvertierungs- und -konsolidierungsvorgänge weitestgehend zu automatisieren, wirkt sich dies zudem positiv auf die Gesamteffizienz aus. Das Ziel dieses Abschnitts ist es, die Integrationsfähigkeit und somit die Nutzung möglichst vieler vorhandener Unternehmensressourcen zu validieren. Es wird daher im Folgenden zunächst ein geeignetes Anwendungsszenario ausgewählt (Abschnitt 6.1.1), das entwickelte Gesamtsystem in die Prozesse und IT-Strukturen integriert (Abschnitt 6.1.2) und so die Betriebsfähigkeit anschließend durch einen Langzeit-Testbetrieb validiert (Abschnitt 6.1.3).

Im Gegensatz zum Flugzeugbau zeichnet sich das Bauwesen durch den Datenstandard des BIM aus. Aufgrund der standardisierten Struktur sind bei der Anbindung BIM-spezifischer Quellsysteme gegenüber dem Fallbeispiel des Flugzeugbaus keine Probleme zu erwarten. Für die 3D-Visualisierung

und das Tracking ist es jedoch erforderlich, die Kompatibilität gesondert zu validieren (Abschnitt 6.1.4).

### 6.1.1 Fallbeispiel: Kabinenausrüstung im Flugzeugbau

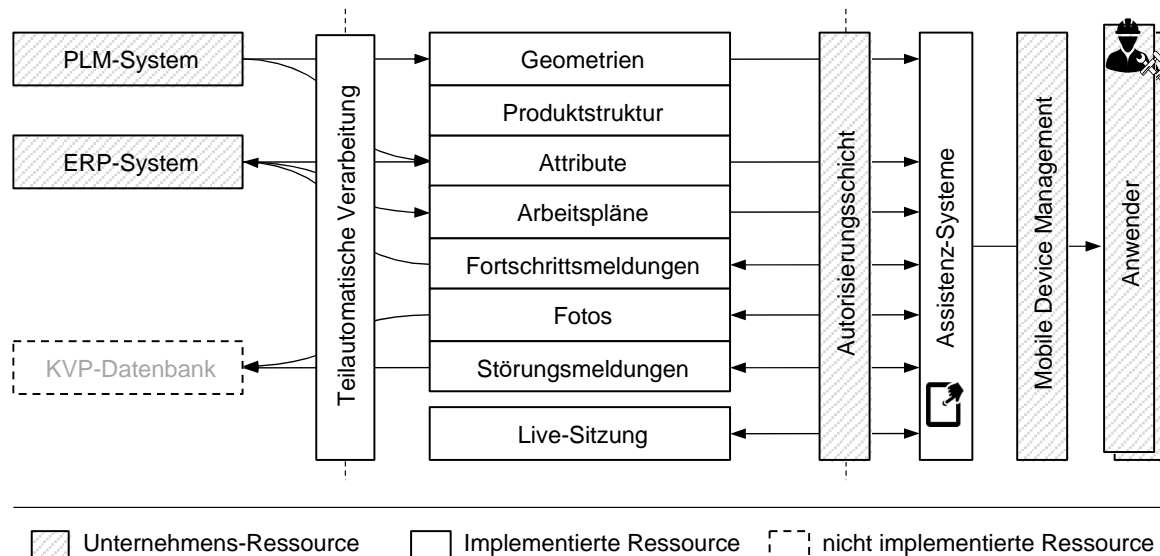
Der Flugzeugbau zeichnet sich durch besonders strenge Regularien hinsichtlich der Sicherheit angewandter Prozesse und Systeme aus. Dies gilt im Besonderen für Bereiche, die über eine Zertifizierung zur Herstellung oder Modifikation von Luftverkehrsfahrzeugen verfügen. Die Kabinenausrüstung unterscheidet sich vom Strukturbau durch einen sehr hohen Anteil manueller Montageprozesse. Die organisatorischen Strukturen sind im Vergleich zum Schiffbau deutlich homogener (weniger Gewerke, höhere Fertigungstiefe), was sich nicht zuletzt in einer besseren Konsistenz der verfügbaren Daten und der IT-Peripherie widerspiegelt: Zwar werden Einzelteile von Ingenieurdienstleistern zugeliefert, es besteht aber dennoch eine vollständige 3D-Repräsentation des Produkts. Und obwohl die operativen Prozesse in ähnlicher Weise wie im Schiffbau einer Vielzahl von Medienbrüchen unterliegen, ermöglichen es die sehr guten daten- und systemtechnischen Voraussetzungen, die Integrationsfähigkeit des Gesamtsystems unter realen Bedingungen zu validieren und so einen Überblick über das Zusammenwirken der entwickelten Assistenzsysteme mit den IT-Systemen des Unternehmens zu geben. Die Implementierung und der Betrieb der in dieser Arbeit entwickelten Systemkomponenten (insbesondere für dieses Fallbeispiel) geschah wiederum im Zuge eines breiter angelegten Testlaufs neben weiteren Komponenten in enger Zusammenarbeit und mit Unterstützung von Herrn Niklas Jahn. Weitere Ergebnisse dieser Tests finden daher in Jahns bisherigen (z. B. [Jahn20], [Jahn20b] und [Jahn22]) und auch zukünftigen Forschungsaktivitäten Anwendung.

### 6.1.2 Aufbau eines Testsystems

Die in Abschnitt 5.6.1 entwickelte Struktur des Gesamtsystems zielt auf eine einfache Integration der entwickelten Lösungen in die Unternehmens-IT ab. Ziel dieses Abschnitts ist es, diese Integration zu vollziehen, sodass diese im weiteren Verlauf der Evaluierung auf ihre Einsatzfähigkeit hin überprüft werden kann. Abbildung 70 gibt einen Überblick über das Testsystem.

Zunächst wurde das mobile Assistenzsystem für Werker in den unternehmensinternen AppStore (Mobile Device Management) übernommen und konnte so von sämtlichen Mitarbeitern einfach auf Dienst-Tablets installiert werden. Es wurde ein unternehmensinterner Identitätsdienst angebunden, sodass sich die Mitarbeiter mit Unternehmenskennungen anmelden und so gegenüber dem zentralen Server authentifizieren konnten.

Die zentrale Serveranwendung wurde mit sämtlichen Funktionen in die unternehmensinterne Cloud-Infrastruktur implementiert und konnte so von jedem Dienst-Tablet aus erreicht werden. Zur Reduzierung der Komplexität wurden nur jene Quellsysteme vom zentralen Server angesprochen, dessen Anbindung als besonders herausfordernd angesehen wurde. Weiter wurde auf eine vollautomatische Anbindung verzichtet. Zwar ist die Verarbeitung inhaltlich mit den Quellsystemen kompatibel und die dort vorliegenden Formate und Strukturen werden korrekt verarbeitet; der Vorgang wird jedoch manuell und nicht automatisch ausgelöst. Grundsätzlich ist die vollautomatische Auslösung, ausgehend von entsprechenden Ereignissen im Quellsystem (z. B. Freigabe einer neuen Bauteil-Version durch einen Konstrukteur), jedoch ebenfalls denkbar.



14417

Abbildung 70: Aufbau des Testsystems

Geometriedaten und die Produktstruktur aus der Konstruktion bzw. dem ERP-System sowie exportierte Attributlisten wurden mittels Fileupload an den zentralen Server übermittelt und dort entsprechend verarbeitet, gespeichert und für die Assistenzsysteme bereitgestellt.

### 6.1.3 Langzeittest und Fazit

Während der Entwicklung des Demonstrators wurden laufend konkrete Entwicklungsstände in die Unternehmensprozesse und -strukturen des beschriebenen Testsystems implementiert. Das Gesamtsystem wird seit drei Jahren von der Luftwaffe testweise betrieben. Der Betrieb und dafür notwendige Anpassungen geschahen in enger Abstimmung mit IT-Experten des Unternehmens, sodass auch das bisherige Fazit auf Expertengesprächen basiert.

Zunächst kann bestätigt werden, dass die Anbindung der relevanten IT-Systeme in der Praxis technisch funktioniert und die Datenbedarfe der Assistenzsysteme dadurch gedeckt werden. Zwar erforderte das Testsystem einen geringen manuellen Aufwand, um die Datensynchronisierung anzustoßen. Dies ließe sich im Produktivbetrieb nach Aussage der Experten jedoch vollständig automatisieren. Auch kann bestätigt werden, dass die Versorgung der Assistenzsysteme mit den zuvor konvertierten bzw. vorverarbeiteten Daten einwandfrei funktioniert und sich auch die vorgesehenen Schnittstellen für den Austausch großer Datenmengen bzw. die Echtzeitkommunikation in der Praxis eignen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Betrieb des entwickelten Gesamtsystems aufgrund der Anbindung bestehender Systeme in Kombination mit den integrierten Vorverarbeitungsschritten manuelle Vorarbeiten weitestgehend vermeidet.

### 6.1.4 Validierung des mobilen Assistenzsystems im Trockenbau

Das Bauwesen zeichnet sich gegenüber dem Flugzeug- und Schiffbau durch den weit verbreiteten BIM-Standard aus. Die etablierten und vor allem quelloffenen Datenstrukturen bieten den Vorteil,

dass sich neue (Software-)Werkzeuge mit wenig Aufwand in eine vorhandene Systemlandschaft eingliedern lassen. In der Praxis zeigt sich, dass es auch hier insbesondere auf operativer Ebene zu einem Bruch der Medien kommt und dort die klassischen Papierunterlagen dominieren. Abbildung 71 bestätigt diese These: Im Zuge der Elektroinstallation wurden die in den 2D-Plänen verzeichneten Positionen und Typisierungen für Schalter und Steckdosen manuell direkt auf die Wände gezeichnet [Rost18, S.263, 269]. Der Ansatz ist pragmatisch und ermöglicht es dem Elektroinstallateur, vorbereitende und wertschöpfende Tätigkeiten zu trennen und so unterbrechungsfrei zu arbeiten.

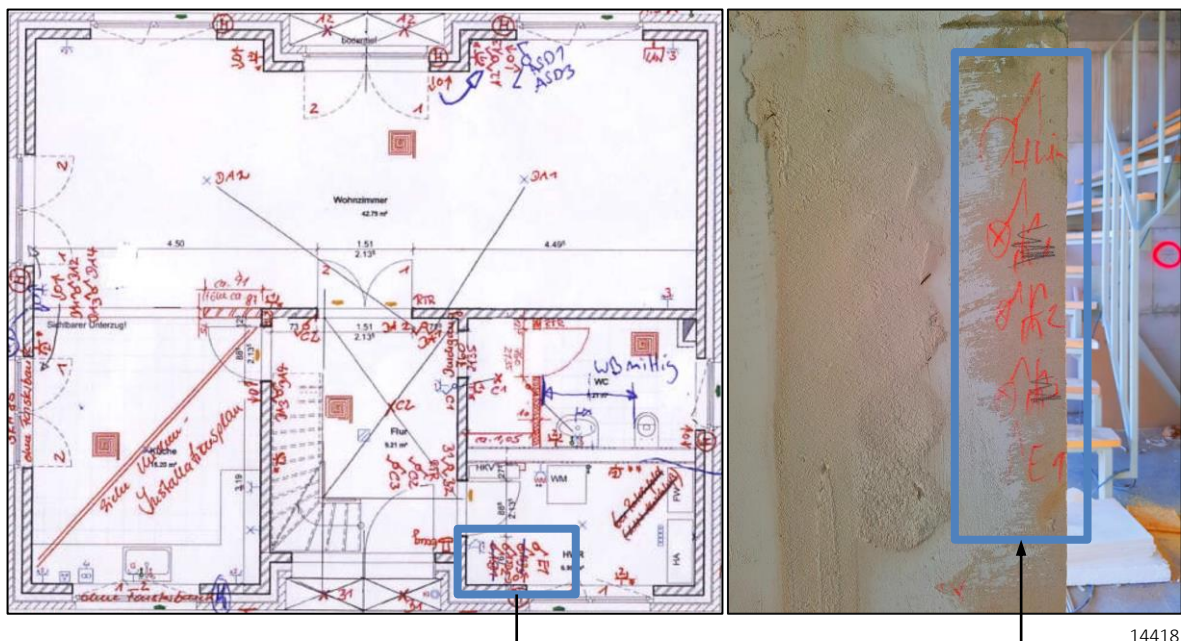


Abbildung 71: Übertragen von Installationshinweisen (2D) in den Bauraum (3D), in Anlehnung an [Rost18, S.263, 269]

Die entwickelten Lösungen verbessern die Prozesse, indem sie die händisch übertragenen Arbeitsanweisungen durch Visualisierungen des Planungsstandes in AR ersetzen. Hierzu ist es jedoch notwendig, dass die Assistenzsysteme und ihre Werkzeuge BIM-kompatibel sind und die entsprechenden Datenformate und -strukturen laden und verarbeiten können.

Um diese Kompatibilität zu validieren, wurde der Trockenbau eines Einfamilienhauses in einem ein-tägigen Testlauf begleitet. Zusätzlich wurde im fertigen Bauzustand der Bauabnahmeprozesse (Aufnahme von Störungspunkten) mit dem entwickelten System begleitet. Neben der allgemeinen Kompatibilität der Lösung wurden auch die dynamische Marker-Positionierung (Abschnitt 5.3.3) sowie das mobile Melden von Störungen (vgl. Abschnitt 5.4.3) getestet. Dazu wurde das 3D-Modell des Objektes in das BIM-eigenen Geometrieformat Industry Foundation Classes (IFC) überführt, vorverarbeitet und in das mobile Assistenzsystem für Werker geladen. Anhand dieses Fallbeispiels konnte sowohl der Bedarf für derartige Assistenzsysteme aufgezeigt als auch die Kompatibilität mit den BIM-Datenstrukturen validiert werden.

## 6.2 Bewertung des qualitativen Nutzens im Praxiseinsatz

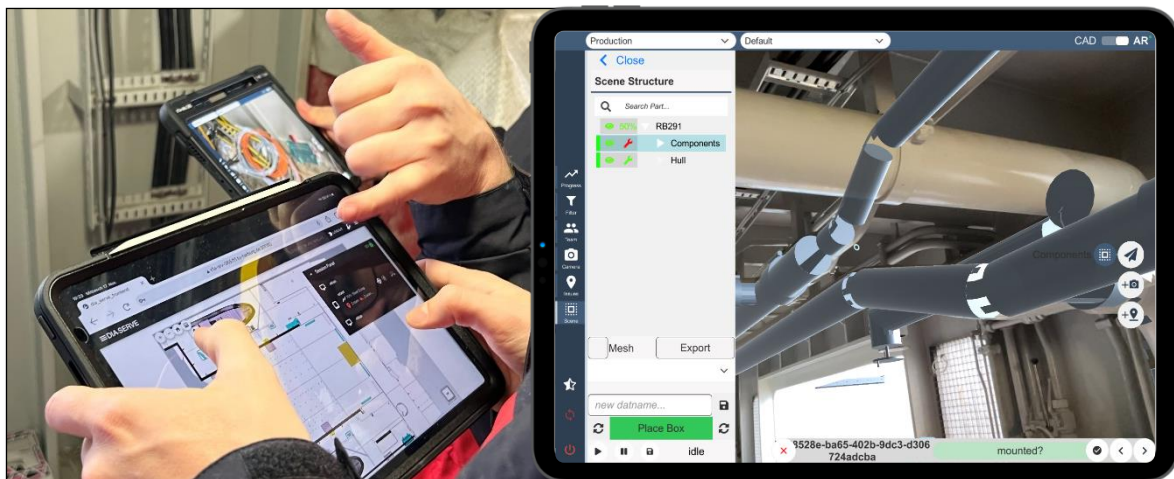
Ziel der folgenden Abschnitte ist es, den Systemnutzen zu bewerten. Zunächst wurde dazu in einem Fallbeispiel aus dem Schiffbau (Abschnitt 6.2.1) die Anwendung in einem Praxiseinsatz durch Werker

und Vorarbeiter aus unterschiedlichen Gewerken erprobt. Im Anschluss wurde die Einschätzung der Experten zum Systemnutzen qualitativ mit Hilfe eines Fragebogens erfasst (Abschnitt 6.2.2).

### 6.2.1 Fallbeispiel: Ausrüstungsmontage im Schiffbau

Die Ausrüstungsmontage des Schiffbaus zeichnet sich durch eine besonders hohe technische sowie organisatorische Komplexität aus: Es treffen viele Gewerke aufeinander, die noch dazu von unterschiedlichen Unternehmen übernommen werden. Durch die starke Hierarchisierung bildet sich zudem eine sehr heterogene Mitarbeiterstruktur aus, sodass hochqualifizierte Bauleiter, gelernte Montagebauer und angelernte Leiharbeitskräfte zusammenwirken. Die organisatorischen Grenzen zwischen zeitlich und örtlich parallel arbeitenden Prozessbeteiligten sind besonders ausgeprägt und die Herausforderungen durch prozedurale und ressourcenbedingte Abhängigkeiten somit besonders hoch. Da sich die ineinander verzahnten Prozesse in der Regel über Jahrzehnte ausgebildet haben, liegen etablierte Vorgehensweisen für die Kommunikation und Zusammenarbeit vor. Weil die Akteure mit den bestehenden Abläufen sehr vertraut sind, lässt sich vermuten, dass sie Änderungen eher kritisch gegenüberstehen. Daher ist der Schiffbau gut dazu geeignet, ein kritisches Meinungsbild zu erfassen.

Als Anwendungsszenario wurde eine internationale Werft ausgewählt und der Umbau einer größeren Schiffssektion für zwei Tage begleitet (vgl. Abbildung 72). Das Szenario ist von einer hohen Modellkomplexität gekennzeichnet und birgt die Herausforderung, nicht konstruierte Bereiche des Schiffs mit speziell für den Umbau nachkonstruierten zu kombinieren.



14419

Abbildung 72: Anwendungsszenario: Retrofit im Schiffbau

### 6.2.2 Expertenbefragung

Zur Evaluation wurden insgesamt zehn Werker und zwei Vorarbeiter aus den Gewerken Stahlbau, Innenausbau, Elektro, Rohrbau und Tischlerei befragt. Alle Probanden erhielten einzeln eine ca. 30-minütige Einführung in das Assistenzsystem. Hierbei wurden sämtliche Funktionen anhand des realen Beispiels erläutert und vorgeführt. Im Anschluss erhielten die Probanden die Möglichkeit das Assistenzsystem selbst in einer Laborumgebung (Konferenzraum nahe der Baustelle) sowie später auch am realen Einsatzort auszuprobieren. Im Anschluss an die ca. einstündige Einführung wurden

die Probanden aufgefordert, einen Fragebogen zu beantworten. Der Fragebogen ist in Anhang B neben den konsolidierten Ergebnissen in Anhang C zu finden.

Das entwickelte System ist ein Zusammenschluss vieler einzelner Funktionen, die für sich gesehen zwar einen positiven Effekt haben können, jedoch erst im Zusammenspiel die Herausforderungen des adressierten Arbeitsprozesses lösen können. Um dieses Zusammenspiel und den daraus resultierenden Nutzen für den betrachteten Produktionsprozess zu bewerten, konzentrierte sich ein erster Fragenblock auf die Bewertung des Nutzens hinsichtlich der Vermeidung von Missverständnissen, der gewerkübergreifenden Kommunikation, der Vermeidung von Nacharbeit sowie der Vermeidung von Nebenzeiten. Abbildung 73 zeigt, dass die Probanden das Gesamtsystem grundsätzlich positiv bewertet haben.

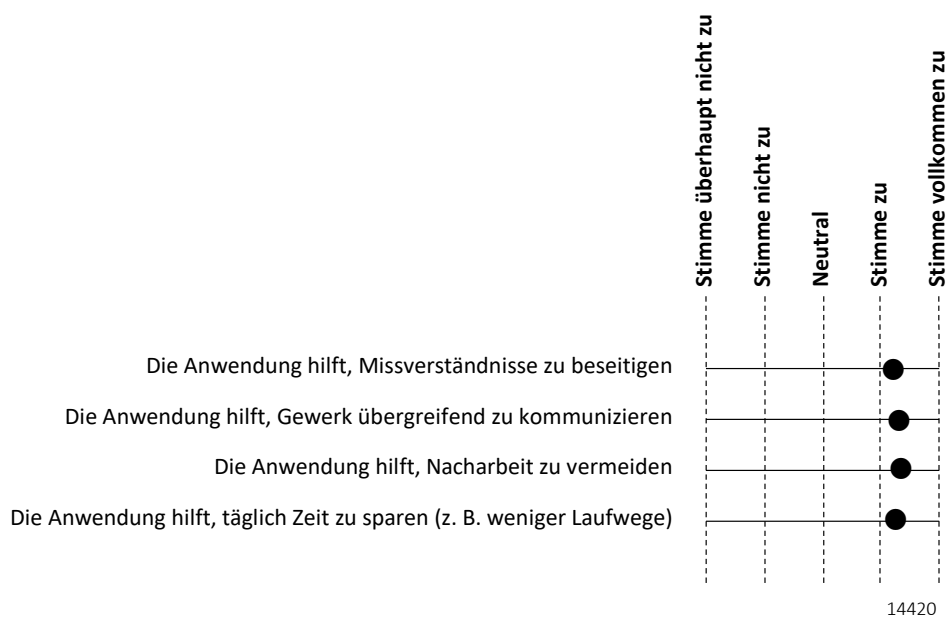


Abbildung 73: Bewertung des Gesamtsystems (n=12)

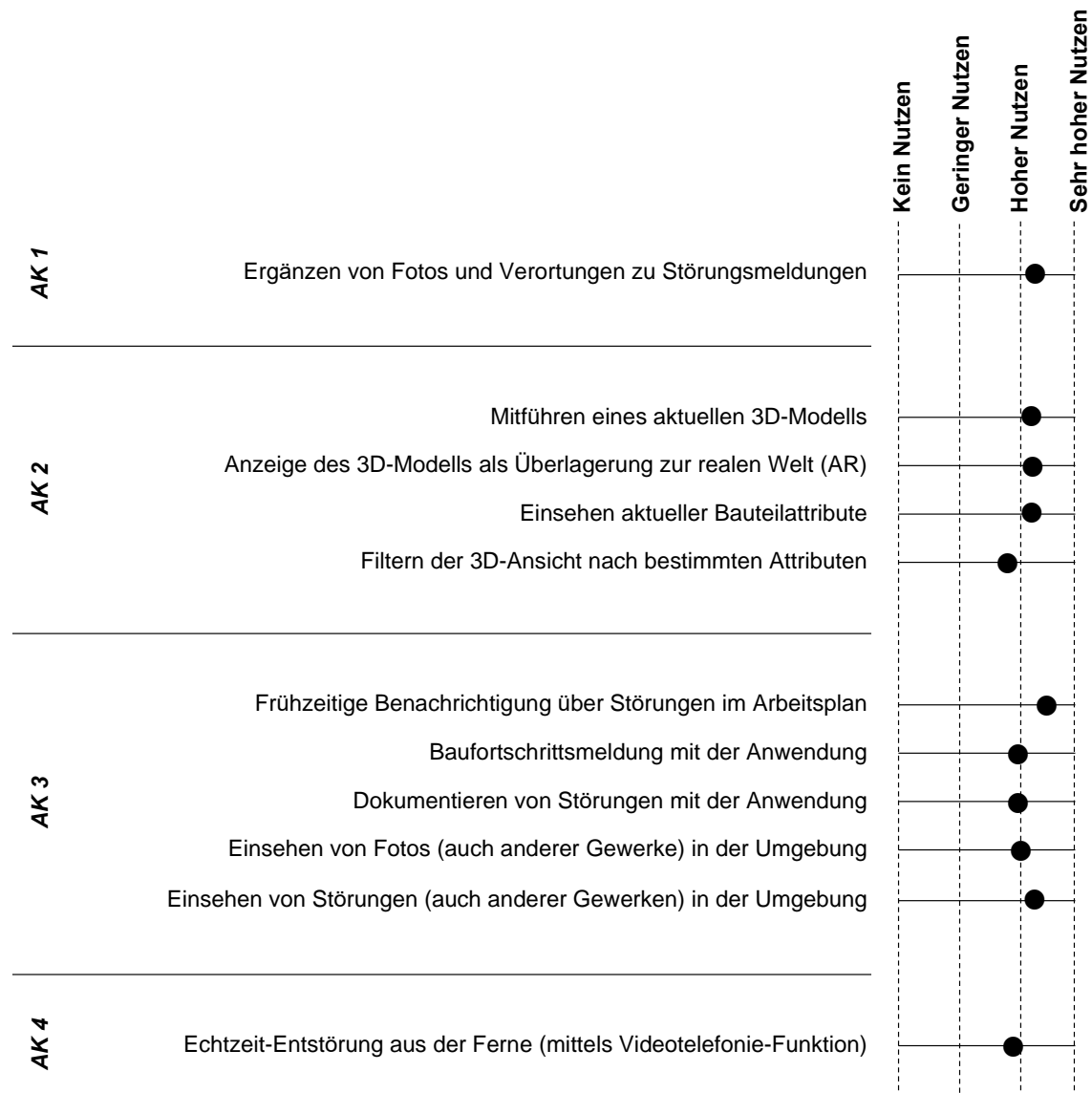
Um den Nutzer der Einzelfunktionen detailliert zu erfassen, haben die Experten in einem zweiten Fragenblock gezielt die für den betrachteten Arbeitsprozess relevanten Aspekte auf Funktionsebene bewertet (vgl. Abbildung 74). Hierbei adressierten die gestellten Fragen (in Anlehnung an Abbildung 68) die zuvor definierten Anforderungskategorien.

### Interpretation

Das Mitführen sämtlicher (3D-)Daten bewirkt, dass insbesondere Laufwege zu Rechnerterminals oder sonstigen Arbeitsplätzen entfallen können. Auch führt das strukturierte und ausführliche Melden von Störungen dazu, dass Missverständnisse im Allgemeinen und über die Grenzen eines Gewerkes / Unternehmens im Speziellen vermieden werden können. Insgesamt stimmen die Probanden zu, dass dies nicht nur einen unmittelbaren Nutzen für den Arbeitsablauf bewirkt, sondern zudem Nacharbeit vermeiden kann.

In Abschnitt 5.2.1 wurde das Prinzip der Inhaltsverortung als zentrales Werkzeug zur Steigerung des allgemeinen Situationsbewusstseins entwickelt. Dieses Prinzip wurde anschließend zur Verortung

von Fotos und Störungsmeldungen angewandt. Die Probanden bestätigen einen hohen Nutzen dieses Verfahrens. Im direkten Gespräch zeigte sich, dass der Mehrwert von Fotos zwar offensichtlich ist, aber die konventionellen Strukturen einen effizienten Austausch nicht vorsehen: Der Austausch per Messenger-Gruppe ist zum einen aus Gründen der Geheimhaltung nicht gestattet und ließe sich zum anderen aufgrund der Komplexität und des Umfangs der Produktionsbereiche nicht effizient abwickeln. Die Abwicklung per E-Mail wäre zwar möglich, jedoch gestaltet sich dies aufgrund fehlender Zugänge und fehlender Kontaktdaten als schwierig.



AK: Anforderungskategorie

14421

Abbildung 74: Nutzwert ausgewählter Funktionen (n=12)

Die gezielte Bereitstellung aktueller Informationen stellte das zweite Handlungsfeld der vorangegangenen Lösungsentwicklung (Anforderungskategorie 2) dar. Die Probanden haben (abseits des Fragebogens) insbesondere der deutlich gesteigerten Aktualität gegenüber papierbasierten Zeichnungen

einen hohen Nutzen zugesprochen. Auch wurde das Prinzip der Interaktion (Filtern der 3D-Ansicht nach bestimmten Attributen) positiv bewertet und wiederum ein hoher Nutzen für den Arbeitsprozess identifiziert. Die Nutzung der AR-Funktionalität bietet zudem die Möglichkeit, Soll- und Ist-Zustand im Bauraum schnell miteinander abzugleichen.

Zu spät oder gar nicht kommunizierte Störungsmeldungen im Baubereich führen zu hohen Aufwänden in Form von Wartezeiten, Laufwegen und klärenden Diskussionen. Die Kriterien der Anforderungskategorie 3 fordern daher das schnelle, jedoch auch gezielte Kommunizieren von Störungen. Durch die Unterstützung der mobilen Assistenzsysteme gelingt zum einen der Meldungsprozess mit wenig Aufwand und liefert zum anderen durch die automatische Verortung einen signifikanten Mehrwert für den Arbeitsprozess. Die Anwender bestätigten zunächst den hohen Nutzen der frühzeitigen Störungsidentifikation durch eine Verknüpfung von Arbeitsplan und Störungsmanagement. Auch das dezentrale, kurzzyklische Melden von Baufortschritten führt aus Sicht der Probanden zu einem hohen Nutzen im Arbeitsprozess. Die Vorarbeiter bewerten insbesondere die erhöhte Transparenz positiv; die Werker geben an, mit dem System Rückfragen und Unterbrechungen verringern zu können.

Die Probanden bestätigen zudem, dass insbesondere die strukturierte Übersicht von Fotos und Störungen im Bauraum einen Mehrwert liefert: Das entwickelte System stellt hier ein einfaches Werkzeug dar, um Fotos fallbezogen aufzunehmen und auszutauschen. Dies ermöglicht es auch, Fotos und Störungen vergangener Bauprojekte (z. B. eines Schwesterschiffs) fallbezogen einzusehen.

Um die Entstörung selbst zu unterstützen, konzentrierte sich das dritte Handlungsfeld auf Werkzeuge, die zeitliche und örtliche Abhängigkeiten bei der Entstörung vermeiden und so z. B. mittels einer Videotelefonie-Funktion die Entstörung in Echtzeit und aus der Ferne ermöglichen. Die Anwender gaben an, dass diese Form der Entstörung zwar nicht alle, aber dennoch viele der täglich auftretenden Probleme effizient lösen kann.

Während der Diskussionen hat sich gezeigt, dass sich insbesondere das zuletzt beschriebene Handlungsfeld zur Unterstützung einer kollaborativen Lösungsfindung nur schwer bewerten lässt, da hierzu eine vollständige Implementierung und flächendeckende Nutzung des Gesamtsystems in die Unternehmensprozesse notwendig wäre.

### **6.3 Bewertung des quantitativen Nutzens in einer Laborumgebung**

Das entwickelte Gesamtsystem bietet insbesondere bei einer vollständigen Nutzung (mehrere Werker und mehrere Bauleiter mehrerer Gewerke) einen hohen Nutzen, weil es die gewerk- und unternehmensübergreifenden Informationsflüsse insbesondere in Bezug auf Störungen des Prozessablaufs optimiert. Der strukturierte Ansatz, Störungen zu dokumentieren, zu übermitteln und zu lösen, schafft eine Transparenz, die es indirekt beteiligten Akteuren ermöglicht, Arbeiten frühzeitig umzuplanen und ineffiziente Nebenzeiten zu vermeiden. Um die Effekte in Gänze zu messen, müsste das entwickelte Gesamtsystem vollständig von einer Vielzahl Prozessbeteiligter eingesetzt und über einen längeren Zeitraum genutzt werden. Dies würde die Einrichtung vollautomatischer Schnittstellen zu Quellsystemen (vgl. Abschnitt 6.1.2) erfordern. Zudem müssten die Anwender den unterneh-

menskritischen Prozess der Ausrüstungsmontage mit einem System im Prototypenstadium abwickeln. Ein Testeinsatz in dieser Form ist daher nicht umsetzbar.

Um den Nutzen des Systems dennoch quantitativ abschätzen zu können, wurde ein Laborversuch gestaltet, der sich auf den Nutzen für den Werker konzentriert. Hierzu wurde zunächst ein Modell entwickelt, das die Zeitanteile eines konventionellen sowie des digitalisierten Störungsprozesses aus Sicht des Werkers differenziert (Abschnitt 6.3.1). Anschließend wurden die empirisch zu bestimmenden Zeitanteile mithilfe des Laborversuchs ermittelt und mit analytisch erfassten, realen Zeitanteilen für unternehmensspezifische Zeitanteile kombiniert (Abschnitt 6.3.2). Als Folge entsteht eine praxisnahe Modellauswertung, die den Transfer der Ergebnisse in die Praxis ermöglicht (Abschnitt 6.3.3). Die Planung und Durchführung der Versuche wurden vollständig im Rahmen einer studentischen Arbeit (vgl. [Ditz22]) durchgeführt. Auch beruhen sämtliche Auswertungen auf den von Ditzel erhobenen Daten.

### 6.3.1 Zielsetzung und Vorgehen

Ziel dieses Abschnitts ist es, ein Vorgehen zu entwickeln, das es ermöglicht, den Nutzen der digitalen Störungsmeldung und -verarbeitung für den Produktionsprozess aus Sicht eines Werkers zu quantifizieren. Schon bei der Analyse realer Arbeitsprozesse hat sich herausgestellt, dass wesentliche unternehmensspezifische Einflussfaktoren existieren. Diese lassen sich zwar exemplarisch in einem Laborversuch nachahmen, spiegeln aber stets nur die sehr individuelle Situation des Beispielunternehmens wider. Um dieses Problem zu lösen, gilt es daher, diese Faktoren zu identifizieren und anhand einer geeigneten Modellierung die Einflussweise aufzuzeigen.

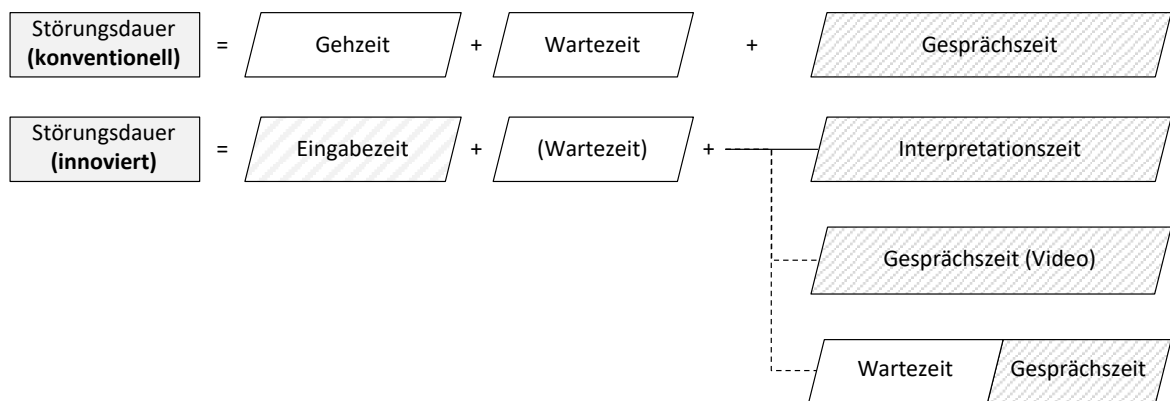
#### Einfluss unternehmensspezifischer Faktoren

Abbildung 75 zeigt die wesentlichen Zeitanteile im konventionellen sowie innovierten Störungsprozess aus Sicht des Werkers.

Wie bereits in der Analyse aufgezeigt, kontaktieren Werker die ihrem Bereich zugewiesenen Bauleiter in der Regel persönlich an deren Arbeitsplatz. Hierzu wendet der Werker je nach Entfernung zum Bauleiter eine entsprechende Gehzeit (Hin- und Rückweg) auf. Zwar besteht auch die Möglichkeit eines Telefonats, auf diese wird jedoch nur in Einzelfällen zurückgegriffen (vgl. Abschnitt 4.2.3). Weiter hat die Analyse gezeigt, dass es je nach Verfügbarkeit (bzw. Auslastung) des Bauleiters zu einer Wartezeit kommt, bevor sich dieser dem vorgebrachten Problem widmen kann. Im Idealfall kann der Bauleiter das Problem anschließend im direkten Gespräch (Gesprächszeit) lösen und der Werker kann nach einem erneuten Laufweg zum Arbeitsplatz seine Tätigkeit fortsetzen. Benötigt der Bauleiter weitere Informationen zur Lösung des Problems, begleitet dieser den Werker zum Arbeitsplatz und setzt das Gespräch dort fort, so dass weitere Geh- und Gesprächszeiten entstehen. Insgesamt führt dieses Verfahren aus Sicht des Werkers zu einer Unterbrechung (Störungsdauer), die sich aus der Summe von Gehzeit, Wartezeit und Gesprächszeit ergibt. Die Gehzeit hängt maßgeblich vom Laufweg zum Bauleiter und die Wartezeit von dessen Verfügbarkeit ab. Die Gesprächszeit wird maßgeblich von dem Problem selbst bestimmt.

Der innovierte Prozess sieht vor, dass Werker Probleme mit dem digitalen Assistenzsystem dokumentieren, indem sie es kurz beschreiben, mittels AR im Bauraum verorten und bei Bedarf durch

Fotos ergänzen. Während die Meldung automatisch dem zuständigen Bauleiter bzw. der zuständigen Bauleitergruppe zugewiesen wird, kann der Werker (sofern die Störung dies nicht verhindert) die Arbeit fortsetzen oder sich anderen Arbeiten widmen. Nach einer Wartezeit, die somit im besten Fall nicht produktivitätswirksam ist, erhält der Werker eine textuelle Antwort des Bauleiters, die ihm als Benachrichtigung direkt angezeigt wird. Um die so vorgeschlagene Lösung zu verstehen und schließlich umzusetzen, bedarf es in diesem Fall jedoch einer entsprechenden Interpretationszeit. Entscheidet der Bauleiter, dass die ihm zugespielten Informationen nicht für eine Entscheidungsfindung ausreichen, kann er sich für eine Echtzeit-Sitzung entscheiden und mittels Videotelefonie das Problem im Dialog aus der Ferne lösen. Werkerseitig ist in diesem Fall eine Gesprächszeit aufzubringen. Entscheidet der Bauleiter, dass ein Besuch vor Ort notwendig ist, wird er dies dem Werker wiederum mittels Benachrichtigung über das Assistenzsystem mitteilen, sich zum Arbeitsort bewegen und dort im persönlichen Gespräch mit dem Werker (Gesprächszeit) eine Lösung erarbeiten. Während der Bauleiter den Weg vom Büro zum Einsatzort zurücklegt, entsteht für den Werker möglicherweise eine zusätzliche Wartezeit (sofern nicht die Möglichkeit besteht, sich anderen Tätigkeiten zu widmen oder die Arbeit fortzusetzen).



Zielgröße    
  Empirisch erhobener Zeitanteil (aus Versuchen)    
  Unternehmensspezifischer Zeitanteil (aus Analyse)

14422

Abbildung 75: Modellierung des konventionellen sowie innovierten Störungsablaufes

Geht man von einem ausreichenden Bestand durchzuführender Tätigkeiten für den Werker aus, weist dieser Prozess keine Abhängigkeiten zu unternehmensspezifischen Faktoren auf. In der Praxis zeigt sich jedoch, dass sich Probleme zwar häufig eine gewisse Zeit aufschieben lassen, irgendwann jedoch die Fortführung der Tätigkeit oder eine alternative Aufgabe nicht mehr durchführbar sind. In diesem Fall entsteht wie im konventionellen Prozess eine Abhängigkeit zur Verfügbarkeit des Bauleiters. Die Zeitanteile für die Eingabe der Störungsmeldung, für die Interpretation eines textuell bereitgestellten Lösungsvorschlags sowie für persönliche Gespräche oder Video-Telefonate hängen wiederum maßgeblich vom Inhalt bzw. der Komplexität des Problems ab, im Falle des innovierten Prozessablaufes zusätzlich auch von der Güte der bereitgestellten Werkzeuge.

Ziel des Laborversuchs ist es, die in Abbildung 75 dargestellten Zusammenhänge zu validieren und im Anschluss insbesondere die unbekannt, nicht unternehmensspezifischen Zeitanteile anhand

eines realitätsnahen Beispielszenarios empirisch zu erheben. Die unternehmensspezifischen Zeitannteile für Geh- und Wartezeiten sind lösungsunabhängig und lassen sich demnach auch in konventionell ablaufenden Prozessen erfassen. Diese Zeitannteile wurden im Rahmen von Zeitaufschreibungen in Realprozessen erhoben. Durch diesen Ansatz kann ein hoher Praxisbezug hergestellt werden, ohne das entwickelte System im vollen Umfang in die Unternehmensprozesse zu integrieren. Abschließend lassen sich so die unterschiedlichen Zeitannteile kombinieren und leicht auf verschiedene Beispielszenarien anwenden.

### 6.3.2 Versuchsaufbau

Um eine möglichst realitätsnahe Arbeitsumgebung zu schaffen, wurde als Anwendungsbeispiel die Montage eines horizontal montierten Regalsystems gewählt, das repräsentativ für die Montage einer Bühnen- bzw. Fußbodenunterstruktur im Schiffbau sein soll. Äquivalente Beispiele aus anderen Branchen sind Unterstrukturen abgehängter Deckenpaneele (Flugzeugbau) oder Unterflur-Kabel- und Rohrführungen (Bauwesen).

Weil die oben genannten Parameter von dem konkreten Inhalt einer Störung abhängen, ist eine Vielzahl realitätsnaher Störungsvorkommnisse erforderlich. Um das Aufkommen von Störungen während des Produktionsprozesses zu garantieren, wurde das zu montierende Objekt im Vorwege präpariert. Hierzu wurden die während der Analyse realer Prozesse erfassten und kategorisierten Störungen verwendet und jeweils zum Montageobjekt passende Beispiele entwickelt. Beispielsweise wurden Teile des zu montierenden Systems beschädigt (verbogen, mit Farbe befleckt oder mit Kleberesten versehen). Zudem wurde ein Teil der Materialien nicht an den zu erwartenden Lagerorten platziert, um materialbezogene Rückfragen zu provozieren.

Die Art der Entstörung (textuell, per Echtzeit-Sitzung oder vor Ort) hängt maßgeblich vom Inhalt der Störung sowie dem Vorwissen des Bauleiters zu den gegebenen Umständen am Montageort ab. Die provozierten Störungen können in der Laborumgebung aufgrund des vereinfachten Montageobjekts und des vorbestimmten Ablaufs in der Regel vom Bauleiter auf alle Arten einfach entstört werden. Um die unterschiedlichen Entstörmechanismen, wie sie auch in der Praxis Anwendung finden, dennoch im Laborversuch nachzubilden, wurde vom Bauleiter die anzuwendende Methodik zur Lösung der Störung ad-hoc per Zufallszahl ausgewählt.

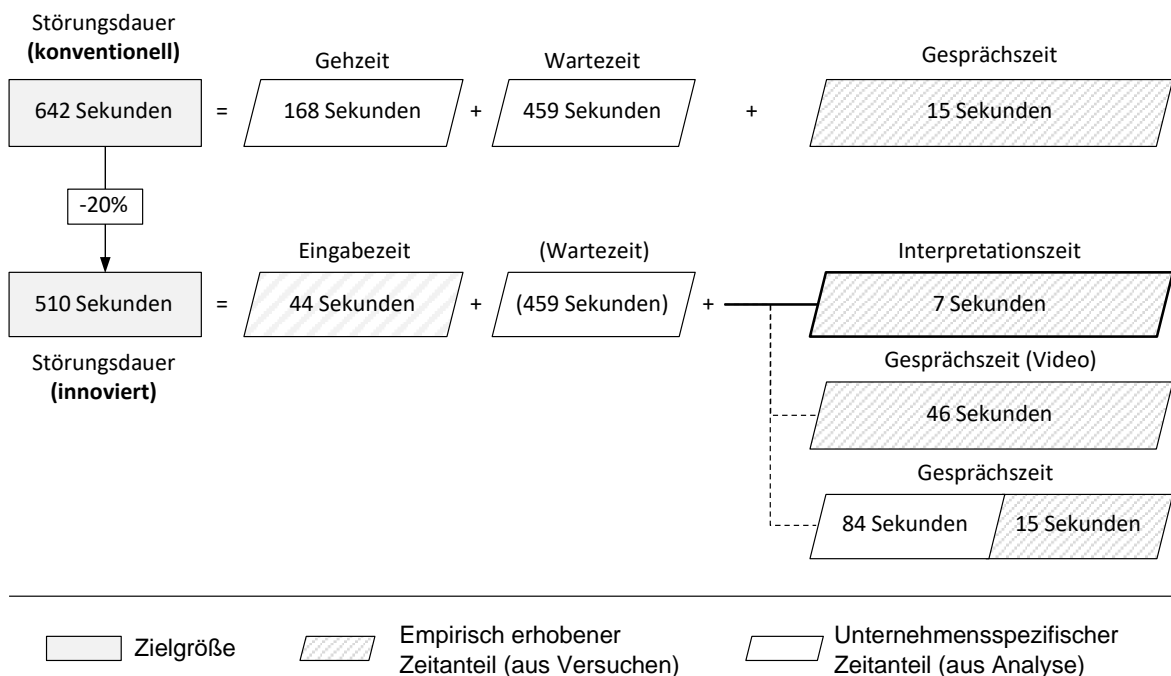
Die jeweiligen Zeitannteile des Modells des Störungsablaufs (Abbildung 75) wurden mithilfe der Zeitaufschreibung einzelner Mitarbeiterzustände erfasst. Umfangreiche Videoaufzeichnungen ermöglichten es, die Zustände sehr genau zu separieren. Der Versuch wurde mit acht Probanden (wissenschaftliches Personal und Studierende) durchgeführt, wobei ein neunter Durchlauf aufgrund technischer Komplikationen nicht in die Auswertung einfluss.

Die Probanden durchliefen den präparierten Montageprozess zweifach, wobei einmal konventionelle Papierunterlagen und einmal das entwickelte, mobile Assistenzsystem zur Verfügung standen. Die Reihenfolge der Versuchsdurchläufe wurde zufällig gewählt, um den Einfluss von Lerneffekten zu minimieren. Ferner wurden auch die Störungen zufällig ausgewählt, jedoch stets homogen in Bezug auf die realen Störungskategorien. Das Montageobjekt wurde für jeden Versuchsdurchlauf neu präpariert. Ein Bauleiter konnte jederzeit bei Problemen kontaktiert werden bzw. stand über das Assistenzsystem auch auf digitalem Wege mit dem Probanden in Kontakt. Die Rolle des Bauleiters

wurde während der Versuche durch den Versuchsleiter selbst (Studierender) eingenommen. Es ist anzumerken, dass die wesentlichen Einflussparameter (Laufweg zum Bauleiter und Verfügbarkeit des Bauleiters) im bestmöglichen Zustand gewählt wurden (die durchschnittliche Gehzeit zum Bauleiter betrug ca. 3 Sekunden und dieser war stets unmittelbar verfügbar). Die entsprechenden Zeitanteile sind daher nicht repräsentativ für reale Probleme und werden für die Auswertung durch in der Praxis erfasste Werte ersetzt. Anhang D zeigt ein Foto und eine Skizze der Einsatzumgebung und Anhang E die Daten der Versuchsdurchführung, welche im Folgenden dargestellt werden.

### 6.3.3 Auswertung und Transfer der Ergebnisse

Die Versuchsdurchläufe führten für den konventionellen Ablauf auf eine Gesprächszeit von ca. 15 Sekunden je Störfall (vgl. Abbildung 76). Während dieses Gesprächs hat der Werker das ihm vorliegende Problem vorgetragen und der Bauleiter einen entsprechenden Lösungsvorschlag unterbreitet.



14423

Abbildung 76: Durchschnittliche Störungsdauer im kombinierten Prozess (Praxis- und Versuchsumgebung)

Für den innovierten Prozess konnte eine durchschnittliche Eingabezeit für neue Meldungen von 44 Sekunden gemessen werden. Diese fällt erwartungsgemäß höher aus als der Zeitaufwand eines direkten, persönlichen Gesprächs, da die gemessene Zeit sowohl die Formulierung des Problems, die Verortung und das Ergänzen von Fotos miteinschließt. Es hat sich gezeigt, dass Anwender insbesondere bei der erstmaligen Benutzung des Systems noch kein Gefühl für einen sinnvollen Umfang der Störungsmeldung haben und infolgedessen mitunter eine Vielzahl zwar hilfreicher, aber nicht notwendiger Fotos ergänzten. Nach Durchlaufen der ersten Störungsfälle entwickelte sich rasch das dafür notwendige Feingefühl und die Eingaben gingen deutlich schneller vonstatten.

Der Zeitaufwand zur Interpretation eines textuell übermittelten Lösungsvorschlags fiel mit ca. 7 Se-

kunden unerwartet niedrig aus. Dies zeigt, dass sich selbst umfangreiche Probleme zumeist mit wenigen, wegweisenden Worten seitens des Bauleiters lösen lassen. Vergleicht man hingegen die Gesprächszeit in einem Videotelefonat (46 Sekunden) mit der Gesprächszeit des konventionellen Prozesses, so fällt diese ca. dreimal so hoch aus. Der Grund liegt insbesondere in der notwendigen (physischen) Fernanleitung des Werkers. Dieser muss das Endgerät so halten, dass das diskutierte Problem vollständig vom Kamerabild erfasst und vom Bauleiter in Augenschein genommen werden kann. Es zeigte sich, dass diese Form der Gesprächsführung komplexer, aber in sämtlichen Fällen ausreichend war. Bei Vor-Ort Besuchen konnte gegenüber dem konventionellen Versuchsdurchlauf erwartungsgemäß keine abweichende Gesprächszeit erfasst werden. Sie betrug in beiden Fällen ca. 15 Sekunden.

Wie bereits erwähnt, wurden im Laborversuch Geh- und Wartezeiten nicht berücksichtigt, da diese sehr stark von den Gegebenheiten der realen Umstände im Unternehmen abhängen. Um dennoch ein schlüssiges Gesamtbild zu erhalten, wurden die unternehmensabhängigen Zeitanteile für Geh- und Wartezeiten exemplarisch in einer unabhängigen Zeitaufschreibung in realen Prozessen erfasst.

Die durchgeführte Analyse in der Kabinenausstattung hat bei der Betrachtung von 20 Störungsfällen mit Beteiligung des Bauleiters auf eine durchschnittliche Gehzeit von 168 Sekunden (für Hin- und Rückweg) und eine durchschnittliche Wartezeit von 459 Sekunden geführt.

Setzt man sowohl die im Laborversuch erhobenen als auch die im Realeinsatz erfassten Zeitanteile in die Gleichungen ein, ergibt sich im konventionellen Fall eine Störungsdauer von 642 Sekunden je Fall und im innovierten Prozess von 510 Sekunden im besten Fall, bei der Entstörung durch eine textuelle Rückmeldung. Dies entspricht einer Verringerung um ca. 20%, wenn davon auszugehen ist, dass Wartezeiten auch im innovierten Prozess in vollem Umfang anfallen und nicht auf alternative Tätigkeiten ausgewichen werden kann. Entscheidet sich der Bauleiter für ein Videotelefonat zur Entstörung, ergibt sich eine Störungsdauer im innovierten Prozessdurchlauf von 549 Sekunden und somit eine Einsparung von ca. 14%. Im Falle eines Vor-Ort Besuches des Bauleiters muss der Werker warten, bis der Bauleiter die Wegstrecke (halbierte Gehzeit) zurückgelegt hat und es ergibt sich (in diesem ungünstigen Fall) eine reduzierte Störungsdauer von 602 Sekunden bzw. eine Einsparung von 6%. Hierbei ist anzumerken, dass die Entscheidung des Bauleiters von der inhaltlichen Präzision der Störungsmeldung abhängt. Dokumentiert der Werker die Störung sorgfältig und fügt beispielsweise aussagekräftige Fotos hinzu, erhöht sich zwar die Meldungszeit, es reduziert sich aber zugleich die Anzahl notwendiger Vor-Ort Besuche.

In den Laborversuchen waren die Anwender bei nahezu allen Störungsfällen in der Lage, die Wartezeit zu nutzen, um die Arbeit fortzusetzen oder sich einer anderen wertschöpfenden Tätigkeit zu widmen. Ließe sich diese These auch für die Praxis bestätigen, würde dies zu einer Reduzierung der durchschnittlichen Störungsdauer um ca. 92% führen (88% bei der Entstörung mittels Videotelefonie sowie 78% bei einem Vor-Ort-Besuch). Im konventionellen Prozess ist die Ausnutzung der Wartezeit nicht unmittelbar möglich, da der Werker in der Regel am Arbeitsplatz des Bauleiters auf dessen Verfügbarkeit wartet.

Wie bereits eingangs erwähnt, sind Geh- und Wartezeiten in hohem Maße von den individuellen Randbedingungen des Arbeitsprozesses abhängig. Um den Einfluss der Gehzeit auf die Gesamtstö-

rungsdauer zu verdeutlichen und eine Möglichkeit zu bieten, den Nutzen für ein spezifisches Szenario abzuschätzen, stellt Abbildung 77 die durchschnittliche Störungsdauer als Funktion der Gehzeit dar.

Alle Entstörprozesse unterliegen zunächst der konstanten (im Realversuch gemessenen) Wartezeit von 459 Sekunden. Im konventionellen Prozess steigt die Störungsdauer aufgrund des linearen Einflusses der Gehzeit an, wobei die im Laborversuch gemessene Gesprächszeit von 15 Sekunden zu addieren ist. Bei Anwendung des innovierten Prozesses muss unabhängig von den Aufwänden zur Entstörung in jedem Fall der Zeitaufwand zur Meldungserstellung (44 Sekunden) berücksichtigt werden. Im Falle eines Vor-Ort-Besuches fällt ebenfalls die Gesprächszeit von 15 Sekunden sowie die Hälfte der Gehzeit an (da der Werker warten muss, bis der Bauleiter die einfache Strecke von seinem Aufenthaltsort zum Einsatzort zurückgelegt hat). Es ergibt sich somit eine Gerade mit halbiertem Steigung gegenüber dem konventionellen Prozess. Im Falle einer Entstörung aus der Ferne (Videogespräch oder textuelle Lösung) ergeben sich von der Gehzeit unabhängige Verläufe (Konstanten).

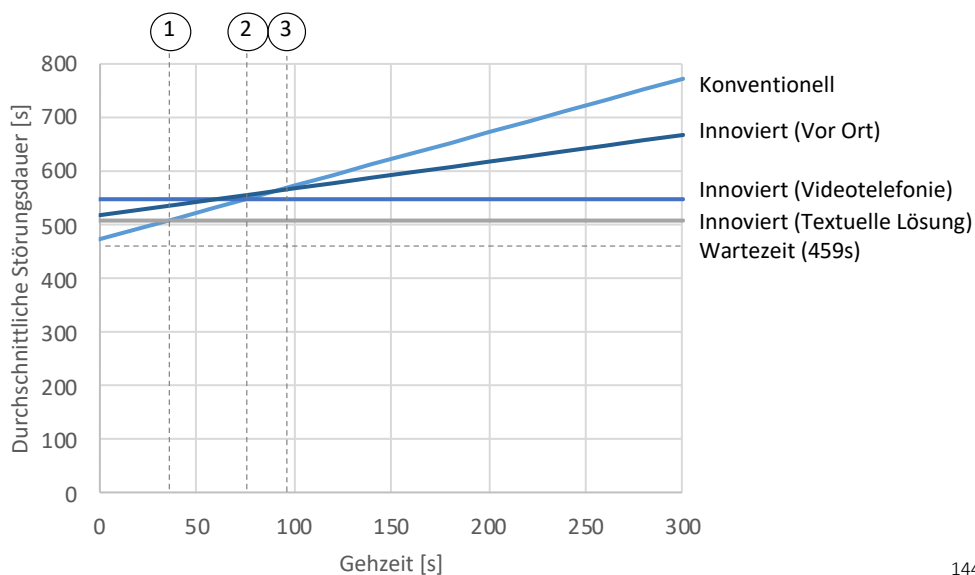
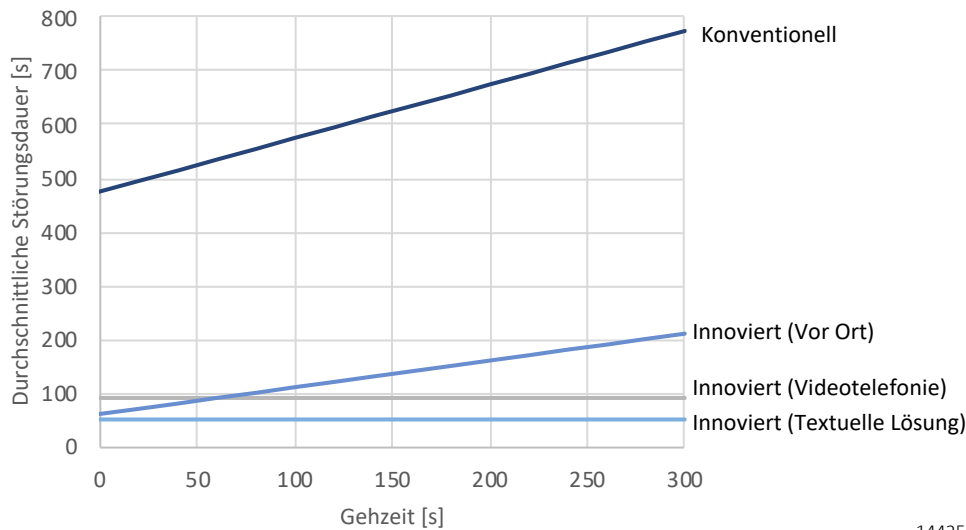


Abbildung 77: Transferszenario des innovierten Störungsprozesses (konservativ)

Geht man davon aus, dass der Großteil von Störungen durch textuelle Benachrichtigung des Werkers zu lösen ist, würde sich für das Beispielszenario ab einer Gehzeit von 36 Sekunden der Einsatz des entwickelten Systems lohnen (1). Ab 75 Sekunden Gehzeit ist auch ein Videotelefonat sinnvoll (2) und ab einer Gehzeit von 88 Sekunden lohnt sich selbst ein Vor-Ort-Besuch im innovierten Prozess (3). Hierbei ist anzumerken, dass sämtliche Fälle davon ausgehen, dass die Wartezeit sowohl im konventionellen als auch im innovierten Prozess nicht produktiv genutzt werden kann. Die Beobachtungen im Laborversuch haben jedoch gezeigt, dass dies für den innovierten Prozess in der Regel nicht zutrifft. Das entwickelte System würde in diesem Fall auch bei einer verschwindend geringen Gehzeit Produktivitätsvorteile bieten: Abbildung 78 stellt dieses theoretische Szenario dar und zeigt, dass im konventionellen Prozess, der weiterhin von der hohen Wartezeit betroffen ist, mindestens mit einer Störungsdauer von 474 Sekunden zu rechnen ist. Dem steht im innovierten Prozess eine

Störungsdauer von 90 Sekunden (im schlechtesten Fall) gegenüber, was ca. 20% entspricht.



14425

Abbildung 78: Transferszenario des innovierten Störungsprozesses (optimistisch)

Mithilfe der dargestellten Verläufe lässt sich für beliebige weitere Praxisbeispiele der individuell zu erwartende Nutzen ermitteln. Hierzu empfiehlt es sich, den vorliegenden Laufweg vom Einsatzort zum Aufenthaltsort des Bauleiters (Hin- und Rückweg) abzulaufen (gegebenenfalls Durchschnittswert bei verschiedenen Einsatzorten) und so die vorliegende Gehzeit zu ermitteln. Zur Bestimmung der Wartezeit (als Konstante) empfiehlt es sich, diese entweder per Zeitaufschreibung im Realprozess zu erfassen oder im Rahmen von Expertenbefragungen abzuschätzen.

### Fazit

Das entwickelte System führt selbst dann zu einem merkbaren Produktivitätsgewinn für die Werker, wenn man die zu erwartenden Potenziale (Transparenzsteigerung, Vermeidung von Wartezeiten, Ermöglichen frühzeitiger Umplanungen, Entlastung des Bauleiters) vernachlässigt. Zwar nimmt die Meldungserstellung mittels digitalem Assistenzsystem erwartungsgemäß gegenüber einer rein mündlichen Übermittlung der Probleme an den Bauleiter mehr Zeit in Anspruch (ca. 44 Sekunden pro Meldung), jedoch ermöglicht die strukturiert dokumentierte Störungsmeldung neue Wege der Entstörung und bietet die Möglichkeit Verfahrensweisen langfristig zu dokumentieren und bei zukünftigen Bauprojekten darauf zurückzugreifen. Bauleiter können auf Grundlage der übermittelten Informationen auch aus der Ferne Lösungen entwickeln sie dem Werker über die entsprechenden Systeme zukommen lassen. Es entfallen Laufwege und Wartezeiten, da Werker ihren Arbeitsplatz nicht verlassen müssen und die Zeit bis zur Lösungsfindung mit anderen Tätigkeiten überbrücken können.

## 7 Schlussbetrachtung

### 7.1 Zusammenfassung

Unikatprodukte wie Kreuzfahrtschiffe, Luxusyachten, Spezialflugzeuge oder einzigartige Bauwerke sind von einer sehr hohen Komplexität sowie Individualität gekennzeichnet. Die Produktion erstreckt sich in der Regel über mehrere Jahre und erfordert das arbeitsteilige Zusammenwirken vieler verschiedener Akteure: Bauleiter koordinieren Vorarbeiter und Werker verschiedener Gewerke und Subunternehmer. Insbesondere in Ausrüstungsprozessen arbeiten die Beteiligten eng getaktet und unter hohem Zeitdruck auf begrenztem Raum. Tritt in einem Teilprozess eine Störung auf, wirkt sich diese auf parallele oder nachgelagerte Arbeitsprozesse aus, verzögert den Gesamtprozess und verursacht Produktivitätsverluste. Um dies zu vermeiden, planen die Unikatproduzenten häufig große Puffer zwischen einzelnen Arbeitsprozessen ein und versuchen so, Teilprozesse zu entkoppeln. Als Folge verlängern sich die ohnehin schon sehr langen Durchlaufzeiten weiter.

Ziel dieser Arbeit war es, ein digitales Assistenzsystem zu entwickeln, das die arbeitsteiligen Produktionsprozesse unterstützt, Störungen möglichst vermeidet und die Tragweite von Folgestörungen im unvermeidbaren Störfall reduziert.

Hierzu wurden zunächst Methoden zur Analyse von Störungsfällen entwickelt, die es ermöglichen, den Umgang mit Störungen aus der Sicht von Werkern sowie aus der Sicht von Bauleitern differenziert analysieren und bewerten zu können. Die Analysen zeigen, dass eine Vielzahl von Störungen durch eine unzulängliche Informationsversorgung der Werker hervorgerufen wird. Insbesondere führen fehlende Informationen über nicht verfügbare Materialien zu temporären Stillständen oder gar Abbrüchen von Arbeitsvorgängen. Aufgrund der komplexen Struktur aus verschiedenen Gewerken und beteiligten Subunternehmern können Störungsverursacher weder die Tragweite von Störungen einschätzen, noch die Betroffenen von Folgestörungen bestimmen. Die Störungsbewältigung erfolgt somit nur lokal zwischen unmittelbar beteiligten Akteuren. Abhängige Folgeprozesse sind hiervon in der Regel ausgeschlossen. Dadurch können Folgeprozesse nicht rechtzeitig auf störungsbedingte Verzögerungen reagieren, sodass hohe und häufig vermeidbare Produktivitätsverluste entstehen.

Die Entstörung obliegt in der Regel den verantwortlichen Bauleitern in einem Baubereich. Analysen dieser Entstörprozesse in der Praxis zeigen, dass die tägliche Arbeit der Bauleiter heute vom Störungsmanagement dominiert wird: Störungen werden in so hoher Frequenz an die Bauleiter herangetragen, dass für Detailüberlegungen zu Lösungen oder Priorisierungen keine Zeit bleibt. Zentrale Aufgaben des Bauleiters, wie die Überwachung und Verbesserung der Produktionsprozesse und die fachliche Anleitung der Arbeitskräfte, können dadurch allenfalls sporadisch erledigt werden.

Um diese Probleme zu lösen, wurden im Schwerpunkt dieser Arbeit drei Artefakte (im Sinne des Design Science Research (DSR) nach [Hevn04, S. 88]) entwickelt und als Demonstratoren umgesetzt:

**1. Ein mobiles Assistenzsystem für Werker**, das diese zum einen durch eine umfangreiche und situationsspezifische Informationsbereitstellung im Regelbetrieb unterstützt und so einen Großteil der

Störungen vermeiden kann. Das System stellt den Arbeitsplan des Werkers angereichert mit individuellen Bauteilattributen wie Lagerorten übersichtlich dar und liefert automatisch Hinweise zu möglichen Problemen einzelner Arbeitsschritte (z. B. wenn sich diese auf störungsbehaftete Bauteile beziehen). Zum anderen ermöglicht das System einen besonders aufwandsarmen Prozess, um Störungen mit den relevanten Informationen zu melden. Werker können Störungsmeldungen mit wenigen Klicks erstellen. Das System reichert diese Meldung automatisch mit hilfreichen Kontextinformationen an, wie beispielsweise einer konkreten Verortung im Bauraum.

**2. Ein zentraler Server** sorgt dafür, dass die erzeugten Meldungen schnell zwischen den Endgeräten der Werker ausgetauscht und zusätzlich an die verantwortlichen Bauleiter übermittelt werden. Andere Werker erhalten automatisch Benachrichtigungen, wenn Störungen in den ihnen zugeordneten Bauräumen gemeldet werden und können so frühzeitig darauf reagieren und beispielsweise andere Arbeitspakete vorziehen.

**3. Ein hybrides Assistenzsystem für Bauleiter** stellt sämtliche Vorgänge in einem Baubereich übersichtlich auf einem 2D-Plan dar. Der Plan visualisiert zum einen aktive und bevorstehende Arbeitspakete. Zum anderen stellt das Assistenzsystem gemeldete Störungen in Echtzeit und mit sämtlichen hinterlegten Informationen dar (Beschreibung, betroffenes Bauteil, Fotos und weitere). Der Bauleiter kann sich so schnell einen Überblick verschaffen, die Störungen priorisieren und ggfs. aufgrund ihrer räumlichen Lage gruppieren. Anschließend hat er die Möglichkeit, einen Lösungsvorschlag als Kommentar zu hinterlegen, den Werker automatisch zu benachrichtigen und Vor-Ort-Besuche anzukündigen und zu koordinieren.

Die Artefakt-Entwicklungen beruhen auf detaillierten Praxisanforderungen und wurden in umfangreichen Praxisevaluationen getestet (Relevanzzyklus im DSR). Werker und Bauleiter haben die Assistenzsysteme unter Realbedingungen erprobt und sprechen ihnen einen hohen Nutzen zu. Laborversuche bestätigen, dass der Aufwand für die Störungsmeldung ebenso zurückgeht wie die von der Störung verursachten Unterbrechungen im Arbeitsablauf. Ein Testsystem wird seit nunmehr drei Jahren in einem Industrieunternehmen betrieben. Dabei hat sich sowohl die Integrationsfähigkeit des Gesamtsystems als auch die Kompatibilität mit den Quellsystemen des Unternehmens bestätigt. Der fortwährende Betrieb des Testsystems belegt zudem die hohe Relevanz der Ergebnisse für die Praxis.

Neben den drei vorgestellten Artefakten wurden im Zuge dieser Arbeit kleinere Methoden und Lösungen für ausgewählte Probleme entwickelt:

- Eine Methode zur Analyse der Kommunikation zwischen Bauleitern und Werkern (vgl. Abschnitt 4.2).
- Ein Ansatz zur Erstellung und Anzeige verorteter Informationen (vgl. Abschnitt 5.2.1).
- Ein Modell zur Verknüpfung produktionsrelevanter Informationen (vgl. Abschnitt 5.3.1).
- Ein Algorithmus zur Erfassung des Baufortschritts durch integrierte LiDAR Sensorik in Tablets (vgl. Abschnitt 5.3.8).
- Ein Algorithmus zur automatischen Verknüpfung von Fotos mit Bauteilreferenzen (vgl. Abschnitt 5.4.4)

Mit diesen empirischen Methoden, Ansätzen und Algorithmen schafft diese Arbeit einen Erkenntnisgewinn im Sinne des Wissenszyklus und leistet so einen Beitrag zur Wissensbasis.

### Fazit

Die vorliegende Arbeit zeigt in einer detaillierten Analyse kollaborativer Arbeitsprozesse die zentrale Bedeutung von Störungen und die Notwendigkeit für ein schnelles und reaktives Störungsmanagement. Die Assistenzsysteme für Werker und Bauleiter vermeiden Störungen, wirken ihrer Ausbreitung entgegen und reduzieren die Aufwände zur Entstörung drastisch. Dies ermöglicht es, die Arbeitsprozesse in der Unikatproduktion zu verdichten und die Durchlaufzeit als eine der zentralen Zielgrößen zu senken. Umfangreiche Praxiseinsätze belegen die Akzeptanz der entwickelten Assistenzsysteme und Abläufe bei Werkern und Bauleitern.

## 7.2 Ausblick

Die Evaluation konnte sowohl die Integrationsfähigkeit als auch den hohen Nutzen des Gesamtsystems nachweisen. Die Erprobung in der industriellen Praxis hat zusätzlich aufgezeigt, dass grundsätzlich das Potenzial besteht, den Nutzen bzw. die Akzeptanz der Lösung weiter zu steigern sowie darüber hinaus weitere Einsatzfelder zu erschließen. Der daraus entstehende Forschungsbedarf wird im Folgenden in drei Themenbereichen zusammengefasst.

### Basis-Technologie

Die eingesetzte Trackingstrategie beruht auf einem markerbasierten Ansatz: Werker können eine mit Markern versehene Werkzeugbox in eine beliebige Ecke des Bauraumes stellen und ausgehend davon die AR-Sitzung beginnen. Mit dieser Strategie ist es auch ungeschulten Mitarbeitern möglich, mit wenig Aufwand ein funktionsfähiges Tracking zu initialisieren, ohne dass hierzu spezielle Messtechnik und entsprechendes Fachwissen notwendig sind. Das Tracking ist anschließend jedoch nur im lokalen Umfeld nutzbar und muss an weiter entfernten Orten erneut initialisiert werden. Bezogen auf den Gesamtproduktionsprozess entsteht so ein nicht unerheblicher Aufwand. Trackingverfahren, die einzig auf Grundlage vorhandener Geometrien arbeiten, weisen hier klare Vorteile auf, da die initialen Einrichtungsaufwände nahezu vollständig entfallen. Zum gegenwärtigen Stand der Technik bedarf es jedoch weiterer Forschung, um den Einsatz der Technologien in großen Umgebungen bzw. in der Baustellenfertigung zu ermöglichen.

### Horizontale Vernetzung

Diese Arbeit hat das Potenzial des digitalen Assistenzsystems für kollaborative Arbeitsprozesse in der Unikatproduktion aufgezeigt. Bezogen auf den gesamten Lebenszyklus eines Produkts, ist dies jedoch nur ein sehr kleiner Ausschnitt. Assistenzsysteme für weitere Prozessphasen wie die Inbetriebnahme, die Kundenübergabe oder die Instandhaltung sind ebenfalls Gegenstand der Forschung bzw. werden zum Teil bereits in der Praxis eingesetzt. Es fällt auf, dass die Systeme in der Regel gezielt für bestimmte Prozesse oder Prozessabschnitte konzipiert sind und darüber hinaus keine Anwendung finden. Als Folge entsteht eine heterogene Systemlandschaft, in der jede Prozessphase mit einem anderen System unterstützt wird. Anzuzeigende Daten müssen für die verschiedenen Systeme unterschiedlich vorbereitet bzw. aufbereitet werden und erzeugte Daten sind untereinander nicht

kompatibel.

Betrachtet man die zugrundeliegenden Informationen, so zeigt sich eine große Schnittmenge: Es werden stets eine Stückliste, ein 3D-Modell, Listen mit Bauteilattributen, Meldungen sowie Checklisten (z. B. als Arbeitsplan) verarbeitet bzw. erzeugt. Es stellt sich daher die Frage, wie ein prozessübergreifend konzipiertes Assistenzsystem bzw. eine Assistenzsystem-Plattform die Teillösungen integrieren und vernetzen kann, um so die beschriebenen Defizite zu lösen und zu profitablen Synergieeffekten zu führen. Eine solche Plattformlösung würde es zudem ermöglichen, periphere Geräte wie smarte Handwerkzeuge oder auch IoT-fähige Sensoren in den digitalisierten Arbeitsprozess einzugliedern. Dies würde den Austausch zwischen Menschen und Maschinen beiderseits erheblich effizienter gestalten: Zum einen könnten Zeitaufwände für das Einstellen von Werkzeugen oder das Ablesen von Messwerten entfallen. Zum anderen könnte die Qualität durch automatische Überprüfungsmechanismen gesteigert werden.

### **Vertikale Integration**

Neben der beschriebenen horizontalen Vernetzung von Assistenzsystemen verspricht die vertikale Integration von Prozessen insbesondere der indirekten Bereiche ein hohes Potenzial und sollte tiefergehend erforscht werden: Die strukturierte Aufnahme von kategorisierten Störungen, ergänzt um Beschreibungen oder durch Fotos, könnte die Störungsbearbeitung und -lösung effizienter gestalten. Mit einem flächendeckenden Einsatz der Assistenzsysteme könnten Unternehmen einen großen und sehr detaillierten Datenbestand aufbauen. Dieser kann als Basis für maschinelles Lernen genutzt werden, um so beispielsweise besonders risikobehaftete Baugruppen und Arbeitspakete im Vorwege zu identifizieren. Der Erkenntnisgewinn kann zu Verbesserungen in sämtlichen vorgelagerten Prozessen beitragen: Arbeitsplaner könnten im Vorwege detailliertere Arbeitsunterlagen bereitstellen, wenn Baugruppen erfahrungsgemäß zu Rückfragen führen. Die Produktionsplanung und -steuerung könnte mit präziseren Planzeiten kalkulieren. Konstrukteure könnten frühzeitig auf mögliche konstruktive Schwachstellen hingewiesen werden und schon im Vertriebsprozess bzw. bei der Angebotserstellung könnten mögliche Störungen und damit verbundene Mehrkosten berücksichtigt werden.

Die beschriebenen Erweiterungen würden den Nutzen der Systeme im Produktionsprozess aber auch darüber hinaus deutlich steigern. Assistenzsysteme haben in derartiger Form das Potenzial, die Zielgrößen Zeit, Kosten und Qualität im gesamten Unternehmen signifikant zu verbessern.

## Literaturverzeichnis

- [Adam98] Adam, D.: Produktions-Management. Gabler, Wiesbaden, 1998.
- [AIDA22] AIDA Cruises: Decksgrundriss AIDAnov. [online] [https://media.aida.de/fileadmin/user\\_upload/v4/Schiffe/Helios/Deckspl%C3%A4ne/AIDAnova\\_Decksgrundriss.pdf](https://media.aida.de/fileadmin/user_upload/v4/Schiffe/Helios/Deckspl%C3%A4ne/AIDAnova_Decksgrundriss.pdf) / [abgerufen am: 29.06.2022].
- [Apt18] Apt, W.; Schubert, M.; Wischmann, S.: Digitale Assistenzsysteme. Perspektiven und Herausforderungen für den Einsatz in Industrie und Dienstleistungen. Berlin, 2018.
- [Atte21] Attenio GmbH: TIO 2 DO. [online] <https://attenio.de/produkte.php#tioDo> / [abgerufen am: 23.04.2021].
- [BBCF22] GitHub: BCF-XML. [online] <https://github.com/BuildingSMART/BCF-XML/tree/master/Documentation> / [abgerufen am: 29.06.2022].
- [BBGM21] Benefit BGM (o. V.): Tipps für Kollaboration und Kommunikation im digitalen Raum. Was Social Collaboration mit (a)synchronen Technologien und Deep Work zu tun hat. [online] [https://benefit-bgm.de/wp-content/uploads/2021/01/Whitepaper\\_Social-Collaboration\\_Tipps\\_fuer\\_gelungenes\\_digitales\\_Miteinander.pdf](https://benefit-bgm.de/wp-content/uploads/2021/01/Whitepaper_Social-Collaboration_Tipps_fuer_gelungenes_digitales_Miteinander.pdf) / [abgerufen am: 28.07.2022].
- [Berg95] Berger, U.: Entwicklung eines sensorgestützten Planungs- und Programmiersystems für den Industrierobotereinsatz in der Unikat-, Einzel- und Kleinserienfertigung. Universität Bremen, Dissertation, Bremen, 1995.
- [Blue21] Bluebeam: Bluebeam Revu. Direkte Teamarbeit. Bessere Bauprojekte. [online] <https://www.bluebeam.com/de/solutions/revu> / [abgerufen am: 26.04.2021].
- [Bokr06] Bokranz, R.; Landau, K.: Produktivitätsmanagement von Arbeitssystemen. Deutsche MTM-Vereinigung (Hrsg.), Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 2006.
- [Borr15] Borrmann, A.; König, M.; Koch, C.; Beetz, J. (Hrsg.): Building Information Modeling. Technologische Grundlagen und industrielle Praxis. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015.
- [Bors15] Borsato, M.; Peruzzini, M.: Collaborative Engineering. In Stjepandić, J.; Wognum, N.; J.C. Verhagen, W. (Hrsg.): Concurrent Engineering in the 21st Century. Springer International Publishing, Cham, 2015. S. 165–196.
- [Broc93] Brockhoff, K.; Hauschildt, J.: Schnittstellenmanagement. Koordination ohne Hierarchie? Manuskripte aus den Instituten für Betriebswirtschaftslehre der Universität Kiel, No. 316, Kiel, 1993.
- [Build21] buildingSMART Deutschland e. V. (o. V.): Standards und Standardisierung. [online] <https://www.buildingsmart.de/bim-knowhow/standards-standardisierung> / [abgerufen am: 27.04.2021].

- [Bund19] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) (Hrsg.) (o. V.): Strukturdaten zur Produktion und Beschäftigung im Baugewerbe - Berechnungen für das Jahr 2018. BBSR-Online-Publikation 17/2019, Bonn, 2019.
- [Bund21] Bundesregierung (o. V.): Siebter Bericht der Bundesregierung über die Entwicklung und Zukunftsperspektiven der maritimen Wirtschaft in Deutschland, 2021.
- [Dani20] Daniotti, B. et al.: BIM-Based Collaborative Building Process Management. Springer, Cham, 2020.
- [DBau22] Deutscher Bauzeiger: Bauleiter Polier. [online] <https://www.deutscherbauzeiger.de/bauen/bauleitung/polier/bauleiter-polier/> [abgerufen am: 29.06.2022].
- [Ditz22] Ditzel, S.: Evaluation digitaler Assistenzsysteme für kollaborative Arbeitsprozesse in der Unikatfertigung. Technische Universität Hamburg, Projektarbeit, Hamburg, 2022.
- [DMGM21] DMG MORI (o. V.): TULIP APPs für die Montage. [online] <https://de.dmgmori.com/produkte/digitalisierung/tulip/industry-solutions/montage/> [abgerufen am: 23.04.2021].
- [Domb21] Dombrowski, U.; Karl, A.; Stefanak, T.; Reiswich, A.; Schade, M.: Ganzheitliche digitale Produktionsgestaltung. In: Dombrowski, U.; Krenkel, P. (Hrsg.): Ganzheitliches Produktionsmanagement. Strategischer Rahmen und operative Umsetzung. Springer Berlin Heidelberg; Imprint: Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2021. S. 32-556.
- [Dsub19] Dsuban, A.; Lohn, J.; Brüggemann, J.-P.; Kullmer, G.: Ein Qualitätssicherungskonzept für die additive Fertigung. In: G. Richard, H.A.; Schramm, B.; Zipsner, T. (Hrsg.): Additive Fertigung von Bauteilen und Strukturen. Neue Erkenntnisse und Praxisbeispiele. Springer Vieweg, Wiesbaden, Heidelberg, 2019, S. 23-34.
- [Duve14] Duve, H.; Cichos, C.: Bauleiter-Handbuch Auftragnehmer. Praxisbeispiele, Checklisten, Musterbriefe. Bundesanzeiger Verlag, Köln, 2014.
- [DWDS22] DWDS – Digitales Wörterbuch der deutschen Sprache (o. V.): verorten. [online] <https://www.dwds.de/wb/verorten/> [abgerufen am: 29.06.2022].
- [Ends00] Endsley, M. R.: Theoretical Underpinnings of Situation Awareness - A Critical Review, 2000.
- [Ends95] Endsley, M. R.: Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems. In: Human Factors Journal 37(1), 1995. S. 32–64.
- [Ever92] Eversheim, W.: Störungsmanagement in der Montage: Erfolgreiche Einzel- und Kleinserienproduktion. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1992.
- [Fabe18] Faber, A.: Entwicklung einer Lean Kultur im Bauwesen. In: Fiedler, M. (Hrsg.): Lean Construction - das Managementhandbuch. Agile Methoden und Lean Management im Bauwesen. Springer Gabler, Berlin, Heidelberg, 2018. S. 453–464.

- [Fell92] Feller, A. H.: Kalkulation in der Angebotsphase mit dem selbsttätig abgeleiteten Erfahrungswissen der Arbeitsplanung. Universität Karlsruhe, Dissertation, Karlsruhe, 1992.
- [Fisc07] Fischäder, H.: Störungsmanagement in netzwerkförmigen Produktionssystemen. Technische Universität Ilmenau, Dissertation, Ilmenau, 2005. Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden, 2007.
- [Freu10] Freude, G.; Ullsperger, P.: Unterbrechungen bei der Arbeit und Multitasking in der modernen Arbeitswelt - Konzepte, Auswirkungen und Implikationen für Arbeitsgestaltung und Forschung. In: Zentralblatt für Arbeitsmedizin, Arbeitsschutz und Ergonomie, 2010, 60; S. 120–128.
- [Frie16] Friedewald, A.; Halata, P. S.; Meluzov, N.; Lödding, H.: Die Produktivitätswirkung von Augmented Reality in der Unikatfertigung. In: Schlick, C. M. (Hrsg.): Megatrend Digitalisierung - Potenziale der Arbeits- und Betriebsorganisation. Wissenschaftliche Gesellschaft für Arbeits- und Betriebsorganisation (WGAB) e.V., GITO-Verlag, Berlin 2016. S. 141-162.
- [Früh90] Frühwald, C.: Analyse und Planung produktionstechnischer Rüstabläufe. Universität Hannover, Dissertation, Hannover 1990. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1990.
- [Gamm21] GAMMA AR (o. V.): Die weltweit fortschrittlichste Bausoftware. [online] <https://gamma-ar.com/funktionen/> [abgerufen am: 23.04.2021].
- [Glöc17] Glöckner, R.; Benter, M.; Grabner, C.; Lödding, H.: Modellierung der Arbeitsproduktivität, DOI:10.13140/RG.2.2.31544.24328, 2017.
- [Glöc20] Glöckner, R.: Entwicklung eines Gesamtmodells der Arbeitsproduktivität und der logistischen Zielgrößen. Technische Universität Hamburg, Dissertation, Hamburg, 2020.
- [Grab14] Grabenstetter, D. H.; Usher, J. M.: Developing due dates in an engineer-to-order engineering environment. In: International Journal of Production Research 52(21), 2014. S. 6349–6361.
- [Gron02] Gronau, N.: Kollaborative Engineering Communities. Arbeitsbericht WI 2001-01, 2002.
- [Gron19] Gronau, N.; Kern, E.-M.; Jonitz, H.: Herausforderungen im Umgang mit Produktionsstörungen. In: Scholz-Reiter, B; Gronau, N. (Hrsg.): Industrie 4.0 Management. Gito, 2019. S. 33–36.
- [Gruß10] Gruß, R.: Schlanke Unikatfertigung. Zweistufiges Taktphasenmodell zur Steigerung der Prozesseffizienz in der Unikatfertigung auf Basis der Lean Production. Gabler, Wiesbaden, 2010.
- [Habe12] Haberfellner, R.; de Weck, O.; Fricke, E.; Vössner, S.: Systems Engineering: Grundlagen und Anwendungen. 12. Aufl., Orell Füssli, Zürich, 2012.
- [Hala15] Halata, P. S.; Friedewald, A.; Hillmer, A.: Augmented-Reality-gestützte Arbeitsunterlagen für die Unikatfertigung. In: Lukas, U. v. et al. (Hrsg.): Go-3D 2015 "Computergraphik für die Praxis" Tagungsband, Rostock 2015, S. 65- 79.

- [Hala18] Halata, P. S.: Augmented-Reality-gestützte Informationsbereitstellung für die Unikatproduktion. Technische Universität Hamburg, Dissertation, Hamburg, 2018.
- [Haux21] Haux, M. A.: Modellierung von Unsicherheiten in der Planung der Unikatproduktion. Technische Universität Hamburg, Dissertation, Hamburg, 2021.
- [HBau20] §57 Hamburgische Bauordnung (HBauO) (o. V.): Bauleiterin oder Bauleiter. Hamburg, 2020.
- [Heil95] Heil, M.: Entstörung betrieblicher Abläufe. Technische Universität München, Dissertation, München, 1994. Deutscher Universitäts-Verlag, Gabler, Wiesbaden, 1995.
- [Hevn04] Hevner, A. R.; March, S. T.; Park, J.; Ram, S.: Design Science in Information Systems Research. In: MIS quarterly, Bd. 28, Nr. 1, 2004. S. 75-106.
- [Hilb14] Hilbert, F.; Scherer, R. J.: Virtuelle Organisation für Bauprojekte. In: Scherer, R. J.; Schapke, S.-E. (Hrsg.): Informationssysteme im Bauwesen 1. Modelle, Methoden und Prozesse. Springer Vieweg, Berlin, 2014. S. 143-165.
- [Hins12] Hinsch, M.: Industrielles Luftfahrtmanagement. Technik und Organisation luftfahrttechnischer Betriebe. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2012.
- [Hins19] Hinsch, M.: Industrielles Luftfahrtmanagement. Technik und Organisation luftfahrttechnischer Betriebe. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2019.
- [Hirs92] Hirsch, B. E.: CIM in der Unikatfertigung und -montage: Leitfaden zum Erfolg. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 1992.
- [HMGo13] HM Government (o. V.): Construction 2025. Industrial Strategy: government and industry in partnership. 2013.
- [Hohb17] Hohberger, S.; Damlachi, H.: Performancesteigerung im Unternehmen. Innovative Tools und Techniken. Springer Gabler, Wiesbaden, 2017.
- [Hors03] Horsch, J.: Innovations- und Projektmanagement. Von der strategischen Konzeption bis zur operativen Umsetzung. Gabler Verlag, Wiesbaden, s.l., 2003.
- [Hüb96] Hübner, H.: Informationsmanagement und strategische Unternehmensführung. Vom Informationsmarkt zur Innovation. Oldenbourg, München, Wien, 1996.
- [IHKR20] Industrie- und Handelskammer zu Rostock (IHK) (o. V.): IHK Branchenmonitor - Die maritime Wirtschaft in Mecklenburg-Vorpommern 2019. Zahlen, Daten und Fakten zur wirtschaftlichen Bedeutung, 2020.
- [Jahn20] Jahn, N.; Friedewald, A.; Lödding, H.: Using the Smartphone as an Augmented Reality Device in ETO Industry. In Lalic, B.; Majstorivic, V.; Marjanovic, U.; von Cieminski, G. Romero, D. (Hrsg.): Advances in Production Management Systems. Towards Smart and Digital Manufacturing. IFIP WG 5.7 International Conference, APMS 2020, Novi Sad, Serbia, August 30 September 3, 2020, Proceedings, Part II. Springer International Publishing; Imprint: Springer, Cham, 2020. S. 538-546.
- [Jahn20b] Jahn, N.: ML-unterstützte Problembeschreibungen in digitalen Assistenzsystemen, Hamburg, Machine Learning in Engineering, Vortrag vom 27.07.2020.

- [Jahn22] Jahn, N; Jansen, T.; Rost, R.; Lödding, H.: Disruption Management in One-Off Production with Collaborative Digital Assistance Systems. In: Plapper, P. (Hrsg.): Digitization of the work environment for sustainable production. Gito, Berlin, 2022. S. 171-192.
- [Jodl19] Jodl, M.: Beamforming mit 5G - Mobilfunk punktgenau (14.05.2019). [online] <https://www.telekom.com/de/blog/netz/artikel/beamforming-5g-mobilfunk-570522> / [abgerufen am: 29.06.2022].
- [Kim95] Kim, M.-H.: Rechnerunterstütztes Störmanagementsystem in der Produktion. Technische Universität Braunschweig, Dissertation, Braunschweig, 1994. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1995.
- [Klap19] Klappe, J.; Gelec, E.; Pokorni, B.; Hämmerle, M.; Rothenberger, R.: Potenziale Digitaler Assistenzsysteme. Aktueller und zukünftiger Einsatz Digitaler Assistenzsysteme in produzierenden Unternehmen. Fraunhofer IAO, Stuttgart, 2019.
- [Klett14] Kletti, J.; Schumacher, J.: Die perfekte Produktion. Manufacturing Excellence durch Short Interval Technology (SIT). Springer Vieweg, Berlin, 2014.
- [Köni07] König, M.; Beißert, U.; Steinhauer, D.; Bargstädt, H.-J.: Constraint-Based Simulation of Outfitting Processes in Shipbuilding and Civil Engineering. In: Proceedings of the 6th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation, 2007.
- [Krcm15] Krcmar, H.: Informationsmanagement. Springer Gabler, Wiesbaden, 2015.
- [Krüg06] Krüger, W.: Excellence in Change. Wege zur strategischen Erneuerung. Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, Wiesbaden, 2006.
- [Krzo20] Krzossa, T.: Lufthansa Technik & Vodafone starten 5G Campus-Netz im Hamburger Flugzeug-Hangar. (27.02.2020). [online] <https://www.vodafone.de/newsroom/netz/vodafone-und-lufthansa-starte-5g-campus-netz> / [abgerufen am: 18.8.2021].
- [Kuhl94] Kuhlmann, T.: Konzeption und Entwicklung eines Systems zur Koordinierung der Produktion komplexer Unikate. Universität Bremen, Dissertation, 1994.
- [Laur98] Laursen, R. P.; Orum-Hansen, C.; Trostmann, E.S: The concept of state within one-of-a-kind real-time production control systems. In: Production Planning & Control. 1998, Heft 6, S. 542-552.
- [Lead20] LeaderSHIP 2020 (o. V.). The sea: new opportunities for the future. Report, European Commission, Brüssel, 2013.
- [Leim15] Leimeister, J. M.: Einführung in die Wirtschaftsinformatik. Springer Gabler, Berlin, Heidelberg, 2015.
- [Leim17] Leimböck, E.; Iding, A.; Meinen, H.: Bauwirtschaft. Grundlagen und Methoden. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2017.
- [Lödd14] Lödding, H.: Gedanken zu einem abgestimmten Management von Kosten, Zeit und Qualität. In: Schuh, G.; Stich, V. (Hrsg.): Enterprise -Integration. Auf dem Weg zum kollaborativen Unternehmen. Springer Vieweg, Berlin, 2014, S. 23–35.

- [Lödd16] Lödding, H.: Verfahren der Fertigungssteuerung. Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2016.
- [Ludw14] Ludwig, T.; Wolnik, K.; Tholen, J.: Beschäftigung, Auftragslage und Perspektiven im deutschen Schiffbau. Ergebnisse der 23. Betriebsrätebefragung im September 2014, Schriftenreihe Institut Arbeit und Wirtschaft, No.19/2014, Institut Arbeit und Wirtschaft (IAW), Universität Bremen und Arbeitnehmerkammer Bremen, Bremen, 2014.
- [Ludw20] Ludwig, T.; Cordes, S.; Emons, O. (Hrsg.): Branchenmonitor: Schiffbau ohne Boots- und Yachtbau (WZ08-30.11). Hans-Böckler-Stiftung, Düsseldorf, 2020.
- [Mark05] Mark, G.; Gonzalez, V. M.; Harris, J.: No task left behind? Examining the Nature of Fragmented Work. In: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. ACM, New York, USA, 2005, S. 321–330.
- [Mast20] Mast, C.: Unternehmenskommunikation: Ein Leitfaden. UVK Verlag, München, 2020.
- [Miss18] Missbauer, H.: Auftragsfreigabe und Produktionssteuerung. In: Corsten, H.; Gössinger, R.; Spengler, T. S. (Hrsg.): Handbuch Produktions- und Logistikmanagement in Wertschöpfungsnetzwerken. de Gruyter, 2018, S. 646-675.
- [Mosk16] Moskopp, M.; Breyer, M.; Hartmann, F.; Stork, W.; Zimmermann, R.; Schreiber, A.; Norda, F.: ShiV 3.0 - Schiffssicherheit, Vermessung und Logistik. In: Statustagung Maritime Technologien. Tagungsband der Statustagung 2016. Forschungszentrum Jülich GmbH Zentralbibliothek Verlag, Jülich, 2016, S. 93 - 107.
- [Mozi21] Mozilla and individual contributors (o. V.): WebSockets. [online] [https://developer.mozilla.org/de/docs/Web/API/WebSockets\\_API](https://developer.mozilla.org/de/docs/Web/API/WebSockets_API) / [abgerufen am: 29.06.2022].
- [Müll07] Müller, T.: Managing cyclical change in the European shipbuilding and ship repair industries. Produced at the request of the European Commission - Social dialogue committee for shipbuilding. Eurofound, 2007.
- [Nort11] North, K.: Wissensorientierte Unternehmensführung. Wertschöpfung durch Wissen. Gabler Verlag, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden, Wiesbaden, 2011.
- [Ocul21] oculavis GmbH (o. V.): Funktionalitäten für neue Wege im Remote Service. [online] <https://oculavis.de/de/produkt/funktionen/> / [abgerufen am: 26.04.2021].
- [Olss98] Olsson, R.: Subcontract coordination in construction. Journal of Production Economics 56-57, 1998, S. 503 - 509.
- [Pesc17] Peschke, F.: Product Lifecycle Management (PLM). Kundennutzen durch integriertes Prozessmanagement. Hanser Carl, München, 2017.
- [Pete95] Petermann, D.: Modellbasierte Produktionsregelung. Universität Hannover, Dissertation, Hannover, 1995.
- [Petr19] Petr; GrabCad: Container house - 5x40", [online] <https://grabcad.com/library/container-house-5x40-1/> / [abgerufen am: 11.08.2022].

- [Plan21] PlanRadar (o. V.): Dokumentieren. Kommunizieren. Berichten. Vor Ort. Mit PlanRadar die Zusammenarbeit verbessern und Bau- & Immobilien-Projekte einfach abwickeln. [online] <https://www.planradar.com/de/> / [abgerufen am: 26.04.2021].
- [PTC21] PTC (o. V.): Vuforia Chalk: Remote Assistance mit Augmented Reality. [online] <https://www.ptc.com/de/products/vuforia/vuforia-chalk/> / [abgerufen am: 26.04.2021].
- [Rauc09] Rauch, N.: Ein verhaltensbasiertes Messmodell zur Erfassung von Situationsbewusstsein im Fahrkontext. Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Inaugural-Dissertation, Würzburg, 2009.
- [REFA22] REFA (o. V.): Vorarbeiter. [online] <https://refa.de/berufe/vorarbeiter/> / [abgerufen am: 24.06.2022].
- [REFA97] REFA (o. V.): Datenermittlung. Carl Hanser Verlag, München, 1997.
- [Refl21] RE'FLEKT GmbH (o. V.): Work Augmentation für Mitarbeiter vor Ort. [online] <https://www.re-flekt.com/de/reflekt-one/> / [abgerufen am: 23.04.2021].
- [Rehä96] Rehäuser, J.; Krcmar, H.: Wissensmanagement im Unternehmen. In: Schreyögg, G.; Conrad, P. (Hrsg.): Wissensmanagement. de Gruyter, 1996, S. 1–40.
- [Ring97] Ringlstetter, M. J.: Organisation von Unternehmen und Unternehmensverbindungen. Einführung in die Gestaltung der Organisationsstruktur. Oldenbourg, München, 1997.
- [Rose17] Rose, C. D.: Automatic Production Planning for the Construction of Complex Ships. Technische Universität Delft, Dissertation, Delft, 2017.
- [Rost18] Rost, R.; Jahn, N.; Friedewald, A.: Smart Inspection: Documenting Issues in 3D with Augmented Reality. In: Proceedings of the 18th Conference on Construction Applications of Virtual Reality (CONVR2018), Auckland, 2018.
- [Scha12] Badke-Schaub, P.; Hofinger, G.; Lauche, K.: Human Factors. Psychologie sicheren Handelns in Risikobranchen. Springer, Heidelberg, 2012.
- [Schm14] Schmidt, C.; Meier, C.; Kompa, S.: Informationssysteme für das Produktionsmanagement. In: Schmidt, C.; Schuh, G. (Hrsg.): Produktionsmanagement. Handbuch Produktion und Management 5. Springer Vieweg, Berlin, 2014.
- [Schm20] Schmiel, S.: Einfluss der Modellqualität auf die Zufriedenheit von Nutzern digitaler Assistenzsysteme. Technische Universität Hamburg, Bachelorarbeit, 2020.
- [Schn88] Schneeweiß, C.: Zur Bewältigung von Unsicherheiten in der Produktionsplanung und -steuerung. In: Wolfgang Lücke (Hrsg.): Betriebswirtschaftliche Steuerungs- und Kontrollprobleme. Wissenschaftliche Tagung des Verbandes der Hochschullehrer für Betriebswirtschaft e. V. an der Universität Göttingen 1987. Gabler Verlag, Wiesbaden, 1988, S. 285–302.
- [Scop21] Scope AR (o. V.): WorkLink. The proven, enterprise-ready, AR knowledge platform. [online] <https://www.scopear.com/home/> / [abgerufen am: 23.04.2021].

- [Seew15] Seewald, S.: Hightechschiffe für den Urlaub auf dem Meer. [online] <https://www.welt.de/sonderthemen/maritimewirtschaft/article147676543/Hightechschiffe-fuer-den-Urlaub-auf-dem-Meer.html> / [abgerufen am: 19.09.2020].
- [Sepp18] Seppänen, O.: Das Location-Based Management-System. In: Fiedler, M. (Hrsg.): Lean Construction - das Managementhandbuch. Agile Methoden und Lean Management im Bauwesen. Springer Gabler, Berlin, 2018, S. 179–198.
- [Shan49] Shannon, C. E.: Communication in the Presence of Noise. In: Proceedings of the IRE (37, 10-21.), 1949.
- [Soka19] SOKA-Bau (o. V.): Leitfaden zum betrieblichen Geltungsbereich der Sozialkassentarifverträge der Bauwirtschaft. Eine Orientierungshilfe für die Praxis. 2019.
- [Spea14] Spearman, M. L.: Of Physics and Factory Physics. In Production and Operations Management (23). Baltimore, 2014, S. 1875-1885.
- [Spec09] Specht, D.: Weiterentwicklung der Produktion. In: Tagungsband der Herbsttagung 2008 der Wissenschaftlichen Kommission Produktionswirtschaft im VHB. Gabler Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, Wiesbaden, 2009.
- [Stal01] Stalleicken, U.: Marktorientierte Produktion komplexer Investitionsgüter-Analysen, Strategien und Konzepte am Beispiel des deutschen Schiffbaus. Dissertation. In: Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 16, Nr. 125, VDI-Verlag, Düsseldorf 2001.
- [Steu21] Steuernagel, K.: Modellbasierter Soll/Ist-Abgleich mittels Daten aus einem 3D-Laserscanning. In: Abbaspour, A. (Hrsg.): Digitales Bauen mit BIM. Use Case Management im Hochbau. Beuth; bSD Verlag, Berlin, Wien, Zürich, Berlin, 2021.
- [Stol03] Stoller-Schai, D.: E-Collaboration: Die Gestaltung internetgestützter kollaborativer Handlungsfelder. Universität St. Gallen, Hochschule für Wirtschafts-, Rechts- und Sozialwissenschaften (HSG), Dissertation, Bamberg, 2003.
- [Supp18] Suppan, J.: Warum überhaupt Kollaboration? [online] <https://www.comconsult.com/warum-kollaboration/> / [abgerufen am: 17.03.2022].
- [Tam11] Tam, V. W.; Shen, L. Y.; Kong, J. S.: Impacts of multi-layer chain subcontracting on project management performance. In: International Journal of Project Management (29 - 1), 2011, S. 108–116.
- [Tiet13] Tietze, F.; Lödding, H.: Analyse der Arbeitsproduktivität in Arbeitsvorbereitung und Produktion von Unikaten. In: Biedermann, H. (Hrsg.): Corporate Capability Management. Wie wird kollektive Intelligenz im Unternehmen genutzt? Gito-Verl., Berlin, 2013, S. 185–210.
- [Tiet17] Tietze, F.: Analyse und Verbesserung der Arbeitsproduktivität in der Unikatproduktion. Technische Universität Hamburg, Dissertation, Hamburg, 2017.
- [Tode01] Todesco, T.: Hyperbibliothek, Stichwort "Kollaboration". [online] [https://www.hyperkommunikation.ch/lexikon/lexikon\\_index.html](https://www.hyperkommunikation.ch/lexikon/lexikon_index.html) / [abgerufen am: 12.07.2022].

- [Töpf09] Töpfer, A.: Lean Six Sigma. Erfolgreiche Kombination von Lean Management, Six Sigma und Design for Six Sigma. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [Tu11] Tu, Y.; Dean, P.: One-of-a-Kind production. Springer, London, 2011.
- [Ulri02] Ulrich, W.: Wörterbuch linguistische Grundbegriffe. Gebrüder Borntraeger Verlagsbuchhandlung, Berlin, Stuttgart, 2002.
- [vGIS21] vGIS (o. V.): BIM and GIS Data In Augmented Reality. [online] <https://www.vgis.io/esri-augmented-reality-gis-ar-for-utilities-municipalities-locate-and-municipal-service-companies/> / [abgerufen am: 23.04.2021].
- [Wand14] Wandt, R.: Modellgestützte Fertigungssteuerung in der Unikatfertigung am Beispiel des Schiffbaus. Technische Universität Hamburg, Dissertation, Hamburg, 2014.
- [Wang96] Wang, R. Y.; Strong, D. M.: Beyond Accuracy: What Data Quality Means to Data Consumers. In: Journal of Management Information Systems (Vol. 12 No. 4), 1996, S. 5–33.
- [Webe93] Weber, R.: Werkstattorganisation und Werkstattsteuerung in der Lean Production. Voraussetzungen, Methoden, praktische Beispiele, Umfeldorganisation. Expert-Verlag, Ehningen bei Böblingen, 1993.
- [Wei12] Wei, Y.: Automatic generation of assembly sequence for the planning of outfitting processes in shipbuilding. Technische Universität Delft, Dissertation, Delft, 2012.
- [West13] Westkämper, E.: Integration in der digitalen Produktion. In: Westkämper, E. (Hrsg.): Digitale Produktion. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2013. S. 133-143.
- [West14] Westkämper, E.; Bauernhansl, T.: Produktionssteuerung. In: Schuh, G.; Stich, V. (Hrsg.): Enterprise-Integration. Auf dem Weg zum kollaborativen Unternehmen. Springer Vieweg, Berlin, 2014. S. 13-22.
- [Wied19] Wiedmeyer, T.: Entwicklung eines Empfehlungsdienstes für Rückmeldungen in einer AR-Anwendung. Technische Universität Hamburg, Masterarbeit, Hamburg, 2019.
- [Winz15] Winz, G.: Qualitätsmanagement für Wirtschaftsingenieure: Qualitätsmethoden, Projektplanung, Kommunikation. Carl Hanser Verlag, München, 2015.
- [Wout17] Wouters, L.; Creff, S.; Bella, E. E.; Koudri, A.: Collaborative systems engineering: Issues & challenges. In: 2017 IEEE 21st International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD). Wellington, 2017, S. 486–491.

## Anhang

## Anhang A - Daten 5G-Versuch [VERTRAULICH]

Dieser Anhang unterliegt der Geheimhaltung und wurde im Zuge der Veröffentlichung entfernt. Zum Zwecke der Begutachtung konnten die Gutachter die entfernten Inhalte einsehen.

## Anhang B - Fragebogen zur qualitativen Nutzenbewertung

### Questionnaire on the potential of the Digital Information Assistant

Dear all,

During the last days you got in touch with the Digital Information Assistant. The tablet application provides workers on the shop floor with up-to-date information. Furthermore, the implemented functions should help to make the communication between workers and disciplines more efficient, to be able to communicate problems early and transparently and thus enable more efficient work on the shop floor.

I would therefore like you as experts to answer the following questions.

Many thanks in advance and best regards

*Robert Rost*

Robert Rost



— Personal Information

Age:

Vocational Training:

Sex:  male  female

Experience in years:

Current work area:

— Application in General

Please assess your agreement with the listed theses.

	Strongly Disagree	Disagree	Neutral	Agree	Strongly Agree
The application in general would help us clarify ambiguities.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
The application in general would save us time during the daily work (e. g. prevent unnecessary walking distances).	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
The application in general would help us prevent rework.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
The application in general would help us especially communicating across disciplines.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
The connections (lines) between 2D information (left) and the 3D view (right) help localizing the necessary information.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

## Questionnaire on the potential of the Digital Information Assistant

— Functions in Detail —

Please assess the general benefits of the listed functions for the work on the shop floor.

	No Benefit	Small Benefit	Large Benefit	Very Large Benefit
Having an up-to-date 3D Model with me.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Viewing the 3D Model as an overlay on the real world (Augmented Reality).	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Seeing up-to-date attributes attached to parts.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Filtering the 3D view according to certain attributes.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Reporting and documenting the work progress with the application.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Getting an early alert on which parts in the upcoming work sequence are affected by issues.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Documenting issues / ambiguities with the application.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Using the videocall functionality to clarify issues / ambiguities over a long distance.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Attaching photos and locations to the issues / ambiguities.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Seeing Issues of me and my colleagues (even from other disciplines) in the area around me.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Seeing photos (even from other disciplines) in the area around me.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

— Target Group —

Please assess the individual relevance for the listed target groups

	No Relevance	Small Relevance	Large Relevance	Very Large Relevance
Usage by Workers	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Usage by Foremen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Usage by _____	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

## Questionnaire on the potential of the Digital Information Assistant

— System Usability Scale —

Please assess your agreement with the following theses.

	Strongly Disagree	Disagree	Neutral	Agree	Strongly Agree
I think that the proposed target group would like to use this application frequently.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
I found the system unnecessarily complex.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
I thought the system was easy to use.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
I think that I would need the support of a technical person to be able to use this system.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
I found the various functions in this system were well integrated.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
I thought there was too much inconsistency in this system.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
I would imagine that most people would learn to use this system very quickly.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
I found the system very cumbersome (hard to manage) to use.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
I felt very confident using the system.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
I needed to learn a lot of things before I could get going with this system.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Thank you for participating!

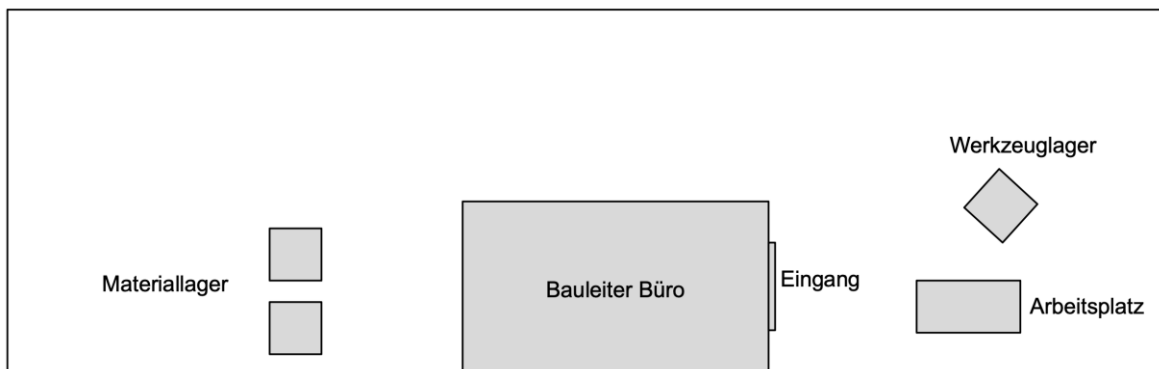
*Robert Rost*

## Anhang C - Auswertung der qualitativen Nutzenbewertung

Frage	Mittelwert der Bewertung	Spannweite Minimum	Spannweite Maximum
<b>Application in General</b>	<b>4,16</b>	<b>3</b>	<b>5</b>
..The application in general would help us clarify ambiguities.....	4,09	4	5
..The application in general would help us especially communicating across disciplines.....	4,17	3	5
..The application in general would help us prevent rework.....	4,25	4	5
The application in general would save us time during the daily work (e. g. prevent unnecessary walking distances).....	4,09	3	5
The connections (lines) between 2D information (left) and the 3D view (right) help localizing the necessary information.....	4,17	4	5
<b>Functions in Detail</b>	<b>3,08</b>	<b>1</b>	<b>4</b>
..Attaching photos and locations to the issues / ambiguities.....	3,25	2	4
..Documenting issues/ambiguities with the application.....	2,92	1	4
..Filtering the 3D view according to certain attributes.....	2,75	2	4
..Getting an early alert on which parts in the upcoming work sequence are affected by issues.....	3,42	2	4
..Having an up-to-date 3D Model with me.....	3,17	2	4
..Reporting and documenting the work progress with the application.....	2,92	2	4
..Seeing issues of me and my colleagues (even from other disciplines) in the area around me.....	3,25	2	4
..Seeing photos (even from other disciplines) in the area around me.....	3,00	2	4
..Seeing up-to-date attributes attached to parts.....	3,17	2	4
..Using the videocall functionality to clarify issues / ambiguities over a long distance.....	2,92	2	4
..Viewing the 3D Model as an overlay on the real world (Augmented Reality).....	3,17	2	4
<b>System Usability Scale</b>	<b>3,15</b>	<b>2</b>	<b>5</b>
..I felt very confident using the system.....	3,50	3	4
..I found the system unnecessarily complex.....	2,50	2	3
..I found the system very cumbersome (hard to manage) to use.....	2,17	2	3
..I found the various functions in this system were well integrated.....	4,00	3	5
..I needed to learn a lot of things before I could get going with this system.....	2,75	2	4
..I think that I would need the support of a technical person to be able to use this system.....	2,67	2	4
..I thought the system was easy to use.....	3,50	3	4
..I thought there was too much inconsistency in this system.....	2,58	2	3
..I would imagine that most people would learn to use this system very quickly.....	3,83	2	5
..I think that the proposed target group would like to use this application frequently.....	4,09	3	5
<b>Target Group</b>	<b>3,23</b>	<b>2</b>	<b>4</b>
..Usage by.....			
..Usage by Foremen.....	3,25	2	4
..Usage by Workers.....	2,92	2	4
<b>Gesamtergebnis</b>	<b>3,30</b>	<b>1</b>	<b>5</b>

- Die Tabelle zeigt die Auswertung des vorangegangenen Fragebogens mit n=12.
- Fragen der Kategorie „Application in General“ und „System Usability Scale“ wurden auf einer fünfstufigen Likerskala von 1: „Strongly Disagree“ bis 5: „Strongly Agree“ eingestuft.
- Fragen der Kategorie „Functions in Detail“ wurden auf einer vierstufigen Likerskala von 1: „No Benefit“ bis 4: „Very Large Benefit“ eingestuft.
- Fragen der Kategorie „Target Group“ wurden auf einer vierstufigen Likerskala von 1: „No Relevance“ bis 4: „Very Large Relevance“ eingestuft.
- Die Ergebnisse der Fragenkategorie „System Usability Scale“ wurden in der Arbeit nicht verwertet, da sich herausgestellt hat, dass die Probanden aufgrund von Sprachbarrieren die alternierenden Fragestellungen zu einem Großteil nicht erkannt haben und die Ergebnisse somit nicht das eigentliche Meinungsbild widerspiegeln.

## Anhang D - Dokumentation des Laborversuchs, nach [Ditz22]



- Das Foto zeigt den Arbeitsplatz in der Testumgebung, das Werkzeuglager sowie die Eingangstür zum fingierten Bauleiter Büro.
- Die Skizze stellt zusätzlich das entfernte Materiallager dar.

## Anhang E - Auswertung des Laborversuchs, nach [Ditz22]

Versuchstyp	Klärungsnummer	Proband	Entstörtyp	Meldungserstellung [s]	Antwort lesen [s]	Sprechen [s]	Videocall [s]
mit App	MA1	1	vor Ort	53		22	
mit App	MA2	1	Videocall	51			32
mit App	MA3	1	Text	54			
mit App	MA4	1	Text	41	5		
mit App	MA5	2	Videocall	92			66
mit App	MA6	3	Text	29	9		
mit App	MA7	3	vor Ort	29		28	
mit App	MA8	3	vor Ort	37			
mit App	MA9	3	vor Ort	24		13	
mit App	MA10	4	Text	37	6		
mit App	MA11	4	vor Ort	25		6	
mit App	MA12	4	Videocall	34			48
mit App	MA13	4	vor Ort	16		36	
mit App	MA14	4	Text	18	3		
mit App	MA15	4	Text	19	4		
mit App	MA16	5	Videocall	127			43
mit App	MA17	5	Text	89	10		
mit App	MA18	6	Text	36	10		
mit App	MA19	6	Videocall	35			44
mit App	MA20	7	Text	28	7		
mit App	MA21	7	Videocall	41			36
mit App	MA22	7	Text	31	6		
mit App	MA23	7	vor Ort	25		14	
mit App	MA24	8	Videocall	98			
mit App	MA25	8	Videocall	43			58
mit App	MA26	8	Videocall	36			
mit App	MA27	8	vor Ort	24		5	
mit App	MA28	8	vor Ort	42		5	
mit App	MA29	8	vor Ort	60		9	
ohne App	OA1	1	Büro				
ohne App	OA1	1	vor Ort			18	
ohne App	OA2	1	vor Ort			10	
ohne App	OA3	1	vor Ort			30	
ohne App	OA4	1	vor Ort			16	
ohne App	OA5	2	vor Ort			11	
ohne App	OA6	2	vor Ort			4	
ohne App	OA7	2	vor Ort			16	
ohne App	OA8	3	vor Ort			46	
ohne App	OA9	3	vor Ort			26	
ohne App	OA10	4	vor Ort			6	
ohne App	OA11	4	vor Ort			9	
ohne App	OA12	4	vor Ort			5	
ohne App	OA13	4	vor Ort			14	
ohne App	OA14	5	vor Ort			9	
ohne App	OA15	5	vor Ort			7	
ohne App	OA16	5	vor Ort			12	
ohne App	OA17	6	vor Ort			6	
ohne App	OA18	6	vor Ort			27	
ohne App	OA19	6	vor Ort			34	
ohne App	OA20	6	vor Ort			14	
ohne App	OA21	7	vor Ort			14	
ohne App	OA22	7	vor Ort			12	
ohne App	OA23	7	vor Ort			20	
ohne App	OA24	7	vor Ort			12	
ohne App	OA25	8	vor Ort			25	
ohne App	OA26	8	vor Ort			6	
ohne App	OA27	8	vor Ort			7	
ohne App	OA28	8	vor Ort			19	
ohne App	OA29	8	vor Ort			6	

- Die Tabelle zeigt die zusammengefassten Daten des quantitativen Laborversuchs mit n=8.
- Die Klärungsnummer wurde verwendet, um Mitarbeiterzustände, die im Kontext derselben Störung auftraten, zu gruppieren.

## Schriftenreihe

### **Band 1**

Koch, Jens Bodo: Unterstützung der schiffbaulichen Projektierung durch Repräsentation von Erfahrungswissen, 2004.

### **Band 2**

Meyer, Sven: Flexible Gruppenarbeit in der Auftragsfertigung, 2004.

### **Band 3**

Joswig, Dirk: Untersuchungen zum Zerspanverhalten weicher Elastomerwerkstoffe, 2005.

### **Band 4**

Kerse, Nils: Unterstützung der schiffbaulichen Produktentstehung durch Einsatz von Virtual Reality (VR)-Technologien, 2007.

### **Band 5**

Kurzewitz, Mathias: Kompetenzentwicklung als Element erfolgreicher Strategieumsetzung – dargestellt am Beispiel des Schiffbaus, 2007.

### **Band 6**

Dauids, Niko: Workflow-Management in Produktentwicklungsprojekten der Investitionsgüterindustrie, 2008.

### **Band 7**

Möller, Carsten: Untersuchungen zum Drehen von gesinterten WC-Co-Hartmetallwalzringen, 2009.

### **Band 8**

Gotsch, Falko: Untersuchungen zum Zerspanverhalten von Elastomerschäumen mit dem Ziel einer wirtschaftlichen Fertigung von Feder-Dämpfer-Bauteilen, 2009.

### **Band 9**

Neumann, Lutz: Risikomanagement bei der Gestaltung von Unternehmenskooperationen – untersucht am Beispiel der Investitionsgüterindustrie, 2009.

### **Band 10**

Sellmer, Dirk: Untersuchungen zur Verbesserung des Arbeitsergebnisses beim Vollbohren unter besonderer Berücksichtigung der Prozesskräfte und der Spanbildung, 2010.

### **Band 11**

Eggers, Daniel: Entwicklung von Dienstleistungsportfolios bei Investitionsgüterherstellern – dargestellt am Beispiel der maritimen Industrie, 2009.

### **Band 12**

Kindler, Jörg: Werkstückqualität und Standzeitorientierung von Zerspanwerkzeugen bei der Umrissbearbeitung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen, 2010.

**Band 13**

Frömming, Hanno: Zerspanung von WC-Co-Hartmetall im unterbrochenen Schnitt, 2011.

**Band 14**

Schweitzer, Thomas: Nutzungsgradsteigerung verketteter Produktionslinien, 2011.

**Band 15**

Wagner, Lars Arne: Szenariobasierte Planung und Steuerung mit Simulation im Schiffbau, 2011.

**Band 16**

Schäfer, Christoph: Einsatzmodell zur systematischen Nutzung von Virtueller Realität in der Unikatproduktion, 2012.

**Band 17**

Hartmann, Dirk: Delamination an Bauteilkanten beim Umrissfräsen kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe, 2012.

**Band 18**

Kuyumcu, Arif: Modellierung der Termintreue in der Produktion, 2013.

**Band 19**

Czumanski, Thomas: Handlungsorientierte Analyse der Arbeitsproduktivität in der Serienproduktion, 2013.

**Band 20**

Schütte, Christoph: Bohren und Hobeln von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen unter besonderer Berücksichtigung der Schneide-Faser-Lage, 2014.

**Band 21**

Wandt, Robert: Modellgestützte Fertigungssteuerung in der Unikatfertigung am Beispiel des Schiffbaus, 2014.

**Band 22**

Eichenseer, Christiane: Beschichtung, thermomechanische Charakterisierung und Spannungsanalyse von Schneidkeramik, 2014.

**Band 23**

Heinig, Martin: Nutzung von Virtuellen Technologien für die Montageplanung von Unikaten, 2015.

**Band 24**

Körkel, Gregor K.: Zerspanbarkeitsbewertung von Faserverbundkunststoffen bei der Fräsbearbeitung dünnwandiger Bauteile in der Großserie, 2015.

**Band 25**

Ramirez Martinez, Juan A.: Flexible Automated Assembly Systems for Large CFRP Structures using Geometrical and Force Information, 2015.

**Band 26**

Dose, Frank: Methode zur wissensbasierten Prozessentwicklung - Ein Ansatz für die Berücksichtigung sich wandelnder Teilsysteme beim Bohren von Schichtverbunden, 2015.

**Band 27**

Trzyna, Daniel: Modellierung und Steuerung von Eilaufträgen in der Produktion, 2015.

**Band 28**

Griefahn, Dominik: Geometrieprüfung innerer Strukturen von Faserverbund-Sandwichbauteilen, 2015.

**Band 29**

Borrmann, Christof: Adaptive Montageprozesse für CFK-Großstrukturen mittels Offline-Programmierung von Industrierobotern, 2016.

**Band 30**

Klingelhöller, Christian: Trennschleifen von CFK-Schalenbauteilen mit räumlich gekrümmten Konturen, 2016.

**Band 31**

Titov, Fedor: Technologiegestützte Angebotserstellung für den Umbau komplexer Investitionsgüter, 2016.

**Band 32**

Tietze, Florian: Analyse und Verbesserung der Arbeitsproduktivität in der Unikatproduktion, 2017.

**Band 33**

Geis, Tobias: Bearbeitungsstrategien zur Zerspanung von Faser-Verbund-Honeycomb-Sandwich, 2017

**Band 34**

Koppold, Nico: Kapazitätsplanung und -steuerung in der Instandhaltungsproduktion von Investitionsgütern, 2017.

**Band 35**

Halata, Philipp Sebastian: Augmented-Reality-gestützte Informationsbereitstellung für die Unikatproduktion, 2018.

**Band 36**

Brügmann, Felix: Bauteilqualität und Werkzeugverschleiß beim Fräsen von CFK-Gelege unter räumlichen Eingriffsbedingungen, 2018.

**Band 37**

Benter, Martin: Analyse von Bewegungsabläufen mit 3D-Kameras, 2018.

**Band 38**

Koch, Christoph: Wertstromanalyse und -design für Auftragsfertiger, 2018.

**Band 39**

Cordes, Marcel: Modellierung von Bahngenaugigkeit und dynamischer Stabilität beim robotergeführten Fräsen, 2019.

**Band 40**

Piontek, Andreas: Modellierung der Termintreue im Auftragsdurchlauf, 2020.

**Band 41**

Grabner, Constantin: Methodengestütztes Produktivitätsmanagement. Entwicklung eines datenbasierten Vorgehens, 2020.

**Band 42**

Glöckner, Robert: Entwicklung eines Gesamtmodells der Arbeitsproduktivität und der logistischen Zielgrößen, 2020.

**Band 43**

Schröder, Henrik: Kompetenzentwicklung in der Montage mit Hilfe virtueller Technologien, 2020.

**Band 44**

Engehausen, Friederike: Modellierung und Auslegung der Reihenfolgebildung mit Rüstfamilien, 2021.

**Band 45**

Sikorra, Jan Niklas: Frühzeitige Aufwands- und Termineinschätzung der schiffbaulichen Unikatproduktion, 2021.

**Band 46**

Haux, Moritz A.: Modellierung von Unsicherheiten in der Planung der Unikatproduktion, 2021.

**Band 47**

von Wenserski, Robert: Helixfräsen und Bohren von laseradditiv gefertigten Bauteilen aus Titan für Luftfahrtanwendungen, 2021.

**Band 48**

Meluzov, Nikolaj: Informationsmanagement für ein digitales Instandhaltungsassistenzsystem, 2022.

**Band 49**

Rost, Jan Robert: Digitale Assistenzsysteme für kollaboratives Arbeiten in der Unikatproduktion, 2023.